



UNIL | Université de Lausanne

FACULTÉ DES GÉOSCIENCES ET DE L'ENVIRONNEMENT
INSTITUT DES DYNAMIQUES DE LA SURFACE TERRESTRE

Artificial Closed Ecosystems, Life Support Systems & Industrial Ecology

Synergies of terrestrial and space R&D
as drivers for implementing sustainability

ANNEX A1 - Oïkosmos Report

**Le programme 'Oïkosmos': Synergies de recherches
terrestre et spatiale sur les écosystèmes clos artificiels**

ANNEXE A1 DE LA THÈSE DE DOCTORAT

présentée à la

Faculté des géosciences et de l'environnement
de l'Université de Lausanne

pour l'obtention du grade de

Docteur en sciences de l'environnement
(PhD in Environmental Sciences / Studies)

par

Théodore BESSON

Master of Science in Biology, UNIL
Master of Advanced Studies, EPFL

Directeur de thèse
Prof. Suren Erkman

LAUSANNE
2022



UNIL | Université de Lausanne

Institut des dynamiques
de la surface terrestre

Le programme « Oïkosmos » :
Synergies de recherche terrestre et spatiale
sur les écosystèmes clos artificiels

Travail de recherche financé par la Direction de l'Université de Lausanne

Théodore BESSON, Responsable de recherche

Sous la direction du Prof. Suren ERKMAN, Groupe Écologie industrielle

Lausanne, Suisse

Version 2016 révisée au 9 juillet 2021

[v4.1 - final]

EXECUTIVE SUMMARY

De par leur longue durée et leur destination éloignée de la Terre, les missions habitées interplanétaires diffèrent profondément de celles effectuées jusqu'à aujourd'hui. En effet, les séjours spatiaux habités traditionnels sont soit de courte durée (mission Apollo), soit s'effectuent à proche distance (cas de la station spatiale internationale).

Au vu de l'allongement des distances et des durées, des limites techniques des lanceurs et des coûts de lancement associés, il devient impossible d'emporter à bord d'un vaisseau spatial tous les éléments nécessaires à la survie, dont la masse est considérable si aucun recyclage de la biomasse embarquée n'est prévu. En conséquence, l'ensemble des déchets organiques de l'équipage, issus de la consommation des ressources (oxygène, eau et aliments) devra être recyclé, afin de produire la nourriture durant la mission et de manière à tendre vers un bouclage complet des flux de matières. Or, la seule solution consiste à s'inspirer du fonctionnement quasiment cyclique des écosystèmes de la Biosphère. C'est pourquoi les agences spatiales développent des projets de systèmes de support de vie biorégénératifs (BLSS), intégrant des approches de « biospiration ».

L'enjeu consiste à concevoir puis réaliser un habitat autosuffisant (énergie mise à part) hébergeant un groupe restreint d'humains, vivant en symbiose avec des organismes (bactéries, microalgues et plantes) au sein d'un « écosystème clos artificiel » (ECA). Ce dernier doit être capable du recyclage le plus complet possible (quasi intégral) de l'air, de l'eau, de la nourriture, ainsi que des divers déchets organiques et inorganiques produits par son fonctionnement.

Afin de préparer les missions habitées d'exploration planétaire dans les conditions les plus réalistes possible, il est ainsi indispensable de bâtir sur Terre un démonstrateur technologique capable de reproduire les contraintes spécifiques des habitats spatiaux en système clos. En complément de son objectif spatial clairement affiché, la construction d'un tel habitat clos aura pour objectifs de réaliser des activités de R&D purement « terrestres » en questionnant des problématiques cruciales qui touchent à des domaines aussi variés que le recyclage de matières, l'utilisation optimale des ressources, l'écotoxicologie, la biosécurité et la vie en milieu confiné, etc.

L'objet de ce rapport Oïkosmos est de présenter l'intérêt d'un agenda de recherche axé sur la convergence entre les recherches spatiale et terrestre sur les ECA au sein d'un habitat sous fortes contraintes. Autrement dit, un simulateur d'ECA présente un potentiel intrinsèque fort pour favoriser les synergies de recherche entre les acteurs (chercheurs, industriels, etc.) du spatial et du non spatial. Avec cette approche « synergistique », un vaste programme scientifique et technologique pourrait permettre à terme de répondre :

1) aux besoins scientifiques spécifiques à une mission spatiale habitée de longue durée et aux enjeux de recherche fondamentale pour un BLSS autonome, c'est-à-dire un système de support de vie en cycle quasi fermé.

2) à des problématiques terrestres, en conduisant des études traitant des aspects de support-vie (fonctionnement des cycles, vie en milieu isolé et confiné), des aspects médicaux (physiologie, télémédecine), du facteur humain (psychologie, habitabilité) ou des structures de support (communication, sécurité et gestion opérationnelle). En outre, la recherche en système clos pourrait servir de catalyseur de l'innovation et de moteur du développement technologique de systèmes de recyclage hautement efficaces, dans la perspective de l'écologie industrielle. Ce banc d'essai d'un nouveau genre pourrait ainsi aider à résoudre certains challenges terrestres actuels, dans un contexte de raréfaction des ressources matérielles et de dissipation toujours plus large de micropolluants dans les écosystèmes naturels, en provenance des activités humaines.

Dans sa première partie, le §1 du rapport Oïkosmos expose le contexte spatial des missions interplanétaires habitées (§1.1). Elle aborde la conquête de l'espace par l'homme au XXI^e (§1.1.1). Puis les contraintes spécifiques des habitats spatiaux utilisés pour une exploration planétaire humaine sont introduites, tout comme les raisons justifiant qu'on puisse les considérer comme des habitats clos, soumis à de fortes contraintes (§1.1.2). Ensuite de quoi le §1.1.3 explicite la nécessité d'embarquer des systèmes de recyclage « bioinspirés » afin de relever le défi d'un bouclage de flux de matières. Enfin, le §1.2 fait un rapide survol des projets de R&D de l'Agence spatiale européenne (ESA) visant à permettre l'envoi à terme d'astronautes sur la planète Mars (MELiSSA, FIPES, Oïkosmos). Par la suite, l'intérêt de l'Université de Lausanne pour le programme de recherche « synergistique » Oïkosmos, initié en 2006, est discuté au §2. Le §3 passe brièvement en revue la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude, en particulier ses objectifs (§3.1), ses activités (§3.2), sa portée initiale (§3.3), les livrables attendus (§3.4), ainsi que l'équipe de recherche (§3.5). Le §4 est quant à lui dédié aux écosystèmes clos artificiels (ECA). Il commence par brosser un tableau des différents systèmes de supports vie (§4.1), avec un accent sur les biorégénératifs (BLSS). Il détaille ensuite les projets de l'ESA en la matière à commencer par MELiSSA (§4.2.1), le projet d'ECA européen, qui ambitionne ultimement un recyclage quasi intégral basé sur la valorisation systématique des déchets organiques produits par un équipage d'astronautes dans le cadre d'une mission interplanétaire habitée vers Mars. Il enchaîne avec les enjeux de la préparation au sol des missions humaines vers Mars (§4.2.2.1) et la présentation du projet de simulateur d'ECA au sol de l'ESA, FIPES (§4.2.2.2). Enfin, il expose l'intérêt du programme de recherche scientifique et technologique Oïkosmos, en illustrant les raisons de son potentiel pour favoriser les synergies de recherches terrestres et spatiales sur les ECA (§4.2.3).

Dans sa deuxième partie, la présente étude identifie, catalogue et détaille les synergies de recherches terrestres et spatiales qui pourraient prendre place au sein d'un simulateur d'ECA ou d'habitat clos. La méthodologie qui a permis la formulation de cet agenda de recherche pour le programme scientifique et technologique Oïkosmos est présentée au §5. Le §6 est consacré au contexte terrestre et explore certaines des tendances lourdes en Europe qui peuvent être associées de manière pertinente à la problématique des ECA et des habitats clos (§6.1). Il s'attarde ensuite sur trois champs disciplinaires en plein essor qui

présentent un fort potentiel pour l'établissement de synergies terrestres et spatiales dans le cadre du programme Oïkosmos. Le premier est le champ d'étude et d'action de l'écologie industrielle (§6.2). Le second champ disciplinaire est celui de la biologie systémique (§6.3). Enfin, le troisième est le champ de recherche des technologies de l'information et de la communication (§6.4). Les chapitres suivants (§7 à §10) constituent le cœur de l'agenda de recherche lié à Oïkosmos. Ils détaillent, articulent et investissent les synergies de recherche liées respectivement au champ disciplinaires 1) de l'écologie industrielle (§7) : avec l'approfondissement des concepts, des stratégies, des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle (§7.2), le pilotage fin et l'optimisation des conditions écosystémiques (§7.3) et le développement de systèmes de recyclage hautement efficaces (§7.4) ; 2) de la biologie systémique (§8) : avec la biosurveillance et le maintien de la santé des organismes : de la génomique à la métabolomique (§8.2) et la nutrition : de la production de nourriture aux approches nutriginomique et microbiomique (§8.3) ; et 3) des technologies de l'information et de la communication (§9) : avec les sciences computationnelles et les sciences informatiques (§9.2) ; les technologies embarquées (§9.3) et la télésanté (§9.4). À la convergence de ces trois champs, la notion d'habitat clos et durable est traitée au §10, qui présente son lien avec les concepts connexes d'éco-habitat (§10.2), d'habitat autosuffisant (§10.3), d'habitat autonome (§10.4), d'habitat sain (§10.5), d'habitat intelligent (§10.6) et enfin des aspects éthiques de la vie en habitat clos (§11). Dans sa conclusion intermédiaire, la Partie II résume les nombreuses applications terrestres qui pourraient jaillir des synergies de recherche abordées précédemment.

Un simulateur d'ECA n'a pas pour vocation d'être un projet exclusivement académique. L'implication du monde économique et de la société semble nécessaire au bon fonctionnement à long terme du programme Oïkosmos. La finalité duale d'un simulateur d'habitat clos, à la convergence du terrestre et du spatial, devrait naturellement le positionner comme une « structure ouverte » aux coopérations interinstitutionnelles et aux échanges avec la société. En complément de son intérêt scientifique, la troisième partie de ce rapport envisage le simulateur d'ECA comme plateforme technologique à même de catalyser les processus d'éco-innovation et d'accélérer le transfert de savoir et de technologie lié aux écosystèmes et aux habitats clos. Elle conceptualise les différentes facettes et modalités d'utilisation du simulateur d'ECA en tant que : installation flexible et dynamique permettant une mutualisation des ressources physiques (§12) ; « Forum » et lieu privilégié de promotion des systèmes clos (§13) ; « Centre de compétences » donnant un accès à une expertise complète sur les systèmes clos (§14) ; « Incubateur » catalysant les processus d'éco-innovation (§15) ; plateforme intégrative favorisant l'interdisciplinarité (§16) ; infrastructure servant à pérenniser la recherche sur les systèmes clos (§17) ; et projet impliquant les citoyens grâce aux sciences participatives et à l'innovation ouverte (§18). Dans ce contexte, l'installation pourrait devenir l'élément central d'un écosystème de parties prenantes tout au long de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » associée aux systèmes clos, et ainsi une infrastructure de R&D accessible tant à des scientifiques, qu'à des entreprises, des

industriels et des citoyens.

La Partie IV de ce rapport dresse un panorama succinct de l'écosystème de l'innovation de Suisse occidentale (§20) et démontre des opportunités offertes par l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale et pour le secteur spatial suisse (§21). Le §22 propose des considérations finales.

Enfin, la cinquième et dernière partie est consacrée à la description de mesures d'accompagnement qui contribueraient au rayonnement du programme Oïkosmos (§23), à l'établissement de recommandations et de suggestions à la Direction de l'Université de Lausanne (§24), ainsi qu'à l'exposition des conclusions générales du rapport Oïkosmos (§25).

Mots clés :

- écosystèmes clos artificiels ; systèmes de support de vie ; écologie industrielle ; écosystèmes industriels ; durabilité.
- synergies de la R&D terrestre et spatiale ; interdisciplinarité ; démonstration au sol ; plate-forme technologique ; transfert de technologie.
- bio-inspiration ; écologie scientifique ; métabolisme industriel ; symbiose industrielle ; biologie des systèmes ; biosurveillance.
- recyclage intégral ; valorisation des déchets ; récupération des ressources ; récupération des nutriments, gestion durable des ressources.
- habitat clos ; habitat autosuffisant ; systèmes clos ; systèmes circulaires.
- applications terrestres ; éco-innovation ; économie circulaire.

REMERCIEMENTS

Ma gratitude va en premier lieu aux contributeurs du rapport Oïkosmos : Dr. Nathalie Chèvre¹, Dr. Emilia Suomalainen², Dr. Claude-Alain Roten³, Dr. Cédric Howald⁴, Dr. Jacques Falquet⁵, Dr. Pierre-Philippe Chappuis⁶, Dr. Frédéric Meylan⁷, Dr. Loïc Leray⁸ et Dr. Gérald Hess⁹. Ils ont toujours fait preuve d'une grande générosité et ce travail n'aurait pu être réalisé dans des conditions aussi agréables sans leur collaboration. Mes remerciements vont également à toutes les personnes qui ont participé à mes entretiens et enquêtes, pour leur temps et l'expertise qu'elles ont partagée avec passion.

Un merci tout particulier à mes nombreux amis et ex-collègues de l'Université de Lausanne : Dr. Guillaume Massard, Dr. Pascale Schwab Castella, Dr. Tourane Corbière, Prof. Julia Steinberger, Prof. Marlyne Sahakian, Dr. Nelly Niwa, Dr. Gabriel Dorthe et Carole Oppliger, qui ont participé de près ou de loin à cette recherche et qui m'ont offert un environnement de travail extrêmement stimulant. Un grand merci également à tous les étudiants et diplômés qui ont participé à cette recherche, Mathieu Breitenstein, Emeline Le Pen et Grégoire Hauser.

Je tiens à remercier à l'Agence spatiale européenne (ESA) : Brigitte Lamaze, Dr. Christel Paillé, Dr. Stéphanie Raffestin, et Pierre Rebeyre ; ainsi que les partenaires de MELiSSA : Rob Sutters, Dr. Helen de Wever, Prof. Francesc Gòdia, Prof. Gilles Dussap et Prof. Max Mergeay pour les échanges substantiels et si utiles tout au long de ces années.

Un immense merci au Dr. Christophe Lasseur, responsable du projet MELiSSA de l'ESA, qui s'est toujours rendu disponible avec des recommandations décisives. Je lui suis reconnaissant pour son admirable volonté de développer la dimension terrestre des systèmes de survie dans l'espace.

Je remercie tout particulièrement le Prof. Philippe Moreillon pour le financement initial du rapport Oïkosmos, ainsi que pour ses contributions significatives et la confiance qu'il a placée dans mon travail.

Enfin, j'exprime ma profonde gratitude au Prof. Suren Erkman, qui m'a initié à l'écologie industrielle en 2005 et m'a ensuite fourni des conseils inestimables sur les écosystèmes clos artificiels. Au cours de ces années de recherche, il m'a offert d'innombrables occasions de découvrir ce concept passionnant, d'en connaître les enjeux et de rencontrer ses praticiens inspirants.

¹ Pour sa contribution aux §7.3.1 et §7.3.3 en lien avec l'écotoxicologie.

² Pour sa contribution au §7.2.6 sur la durabilité systémique.

³ Pour sa contribution au §8.2.2 sur la génomique.

⁴ Pour sa contribution au §8.3.3.3 sur la microbiomique.

⁵ Pour sa contribution au §7.3.4.3 sur les capacités d'adaptation des écosystèmes.

⁶ Pour sa contribution au §7.3.4.3 sur la chimie verte.

⁷ Pour sa contribution au §7.4.3 sur la valorisation du dioxyde de carbone.

⁸ Pour sa contribution au §10.3 sur l'agriculture urbaine.

⁹ Pour sa contribution au §11.2 sur aspects éthiques de la vie en habitat clos.

TABLE DES MATIÈRES

EXECUTIVE SUMMARY	3
REMERCIEMENTS	7
TABLE DES MATIÈRES.....	8
LISTES DES FIGURES.....	17
LISTE DES TABLEAUX.....	18
ACRONYMES	19
STRUCTURATION DU RAPPORT	20
PARTIE I : INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE	22
1 Constats et contexte spatial.....	24
1.1 Les missions interplanétaires habitées nécessitent un système de recyclage quasi intégral	24
1.1.1 <i>La conquête de l'espace par l'Homme au XXI^e siècle</i>	<i>24</i>
1.1.2 <i>Les contraintes spécifiques des habitats spatiaux pour l'exploration planétaire.....</i>	<i>26</i>
1.1.3 <i>La bioinspiration, solution pour un bouclage des flux de matières et d'énergie.....</i>	<i>27</i>
1.2 L'Agence spatiale européenne prépare les missions spatiales habitées via les projets MELiSSA, FIPES et Oïkosmos	29
2 Intérêt de l'Université de Lausanne pour le programme Oïkosmos.....	30
3 Méthodologie du rapport	32
3.1 Objectifs	32
3.2 Activités.....	33
3.3 Portée initiale.....	34
3.4 Livrables.....	34
3.5 Ressources et équipe de recherche	34
4 Introduction sur les écosystèmes clos artificiels (ECA).....	35
4.1 Les systèmes de support-vie biologiques ou biorégénératifs (BLSS).....	35
4.1.1 <i>Les systèmes de support-vie non-régénératifs (physico-chimiques)</i>	<i>37</i>
4.1.2 <i>Les systèmes de support-vie régénératifs (biologiques ou hybrides).....</i>	<i>37</i>
4.1.3 <i>Les systèmes de support-vie écologiques contrôlés (CELSS)</i>	<i>44</i>

4.1.4	« Biosphere 2 », un système clos à grande échelle	45
4.1.5	Les agences spatiales privilégient les écosystèmes simplifiés, plus facilement maîtrisables	47
4.2	Les projets de l'Agence spatiale européenne liés aux ECA	49
4.2.1	Le système de support-vie MELiSSA : l'ECA européen pour le recyclage des déchets organiques de missions spatiales habitées.....	49
4.2.1.1	L'ESA, une organisation couvrant l'ensemble des domaines du spatial.....	49
4.2.1.2	La fonctionnalité principale de MELiSSA vise à régénérer et à valoriser les déchets organiques	51
4.2.1.2.a	Les organismes des compartiments de la boucle MELiSSA	53
4.2.1.2.b	Le compartiment I (liquéfaction).....	55
4.2.1.2.c	Le compartiment II (photohétérotrophe).....	57
4.2.1.2.d	Le compartiment III (nitrification).....	57
4.2.1.2.e	Les compartiments IVa et IVb (photosynthèse).....	58
4.2.1.3	Les projets liés à MELiSSA	61
4.2.1.3.a	Les expériences préliminaires en vol.....	61
4.2.1.3.b	La méthodologie ALISSE.....	62
4.2.1.3.c	L'étude FOOD.....	64
4.2.1.3.d	Le projet BELISSIMA	64
4.2.1.4	Le MELiSSA Pilot Plant, l'installation pilote pour l'intégration progressive des sous-systèmes MELiSSA, mais sans l'Homme.....	65
4.2.1.5	Le transfert de technologie : ramener l'innovation spatiale sur Terre.....	68
4.2.2	Le simulateur au sol FIPES : le futur démonstrateur technologique de l'ESA	70
4.2.2.1	La préparation au sol des missions humaines d'exploration planétaire	70
4.2.2.1.a	L'étude HUMEX, une revue des réponses, des limites et des besoins de l'homme lors de missions interplanétaires	71
4.2.2.1.b	L'étude REGLISSE, une revue des démonstrateurs au sol et des infrastructures pour la préparation de missions humaines interplanétaires.....	72
4.2.2.1.c	Le projet Mars500, un simulateur d'habitat clos	73
4.2.2.1.d	L'installation : envihab, l'exploration des effets de conditions extrêmes sur l'homme	74
4.2.2.2	Le simulateur d'ECA : un banc d'essai indispensable pour faire face à des problématiques aussi bien spatiales que terrestres	75
4.2.2.2.a	FIPES, un analogue capable de reproduire fidèlement certaines des contraintes spécifiques aux habitats spatiaux.....	75
4.2.2.2.b	Le simulateur d'ECA, un laboratoire pertinent indépendamment du spatial	80
4.2.3	Le programme Oïkosmos : un agenda de recherche axé sur la convergence entre recherches spatiales et terrestres.....	81
4.2.3.1	L'approche synergistique du programme de recherche.....	81
4.2.3.2	Des synergies du spatial vers le terrestre, et vice-versa	83

PARTIE II : LE PROGRAMME OÏKOSMOS : SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS85

5	Introduction méthodologique	88
5.1	Identification de la portée préliminaire du rapport.....	90
5.1.1	<i>Revue de la littérature basée sur la portée initiale du rapport.....</i>	<i>91</i>
5.1.2	<i>Prise de contact avec les membres du Consortium MELiSSA.....</i>	<i>91</i>
5.1.3	<i>Consolidation de l'approche du rapport.....</i>	<i>92</i>
5.1.3.1	Une approche systémique.....	92
5.1.3.2	Une approche biomimétique.....	93
5.1.3.3	Une approche « cycle de vie ».....	93
5.1.3.4	Une démarche transdisciplinaire, interdisciplinaire et intégrative	94
5.1.3.5	Une stratégie collective et coopérative.....	94
5.1.3.6	Une démarche systématique, empirique et itérative.....	95
5.1.3.7	Une stratégie opérationnelle.....	95
5.1.4	<i>Portée préliminaire du rapport : domaines de recherches pertinents.....</i>	<i>96</i>
5.2	Catalogage des domaines favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale	98
5.2.1	<i>Domaines pertinents favorisant les synergies de recherche avec les institutions suisses, principalement en Suisse occidentale.....</i>	<i>100</i>
5.2.1.1	Université de Lausanne (UNIL).....	100
5.2.1.1.a	<i>Faculté de biologie et de médecine (FBM).....</i>	<i>101</i>
5.2.1.1.b	<i>Faculté des géosciences et de l'environnement (FGSE)</i>	<i>105</i>
5.2.1.1.c	<i>Faculté des sciences sociales et politiques (FSSP)</i>	<i>105</i>
5.2.1.1.d	<i>Faculté des hautes études commerciales (HEC).....</i>	<i>106</i>
5.2.1.2	Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV).....	107
5.2.1.3	École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)	108
5.2.1.3.a	<i>Faculté Environnement naturel, architectural et construit (ENAC)</i>	<i>109</i>
5.2.1.3.b	<i>Faculté Sciences de la Vie (SV).....</i>	<i>111</i>
5.2.1.3.c	<i>Faculté Sciences et techniques de l'ingénieur (STI).....</i>	<i>112</i>
5.2.1.3.d	<i>Faculté Informatique et Communications (IC).....</i>	<i>115</i>
5.2.1.3.e	<i>Faculté Sciences de base (SB)</i>	<i>115</i>
5.2.1.3.f	<i>Collège du Management de la Technologie (CDM).....</i>	<i>117</i>
5.2.1.4	Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM).....	117
5.2.1.5	Autres institutions de recherche suisses	119
5.2.1.6	Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions suisses.....	124
5.2.1.6.a	<i>Le Human Brain Project.....</i>	<i>125</i>
5.2.1.6.b	<i>L'initiative SystemsX.ch.....</i>	<i>126</i>
5.2.1.6.c	<i>Le projet Nano-Tera</i>	<i>126</i>
5.2.1.6.d	<i>Le centre Smart Living Lab</i>	<i>127</i>
5.2.1.6.e	<i>Le Swiss Integrative Center for Human Health.....</i>	<i>128</i>
5.2.1.6.f	<i>Le projet EssentialTech</i>	<i>128</i>

5.2.1.6.g	<i>Le programme Anthropos</i>	128
5.2.1.6.h	<i>La plateforme Ethos</i>	129
5.2.1.7	Plateformes technologiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie.....	129
5.2.2	<i>Sélection des domaines clés favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale</i>	134
5.3	Consolidation de la portée du rapport.....	136
5.3.1	<i>Exploration du contexte terrestre et identification des champs disciplinaires clés dans le cadre d'Oikosmos</i>	137
5.3.2	<i>Articulation des domaines de recherche clés autour des clusters de Suisse occidentale</i>	138
5.3.3	<i>Portée consolidée du rapport : domaines de recherche clés</i>	139
5.3.3.1	Écologie industrielle.....	139
5.3.3.2	Biologie systémique.....	140
5.3.3.3	Technologies de l'information et de la communication.....	141
5.3.3.4	Habitat clos et durable.....	142
5.4	Formulation d'un agenda de recherche pour le programme Oikosmos.....	143
6	Contexte terrestre	144
6.1	Les tendances lourdes renforçant la pertinence du programme Oikosmos.....	144
6.1.1	<i>Évolution démographique : une population européenne vieillissante</i>	144
6.1.2	<i>Évolution épidémiologique : une population européenne affectée par des maladies chroniques, exposée à des pollutions environnementales, et présentant des comportements à risque</i>	145
6.1.3	<i>Amélioration de la performance environnementale : une progression indispensable dans un contexte d'augmentation continue de la pression sur les ressources</i>	146
6.1.4	<i>Les contraintes des habitats terrestres de demain de plus en plus similaires à celles des habitats clos</i>	148
6.2	L'essor du champ d'étude et d'action de l'écologie industrielle.....	151
6.2.1	<i>Comprendre l'écosystème industriel</i>	151
6.2.2	<i>Améliorer la performance environnementale de l'écosystème industriel</i>	152
6.2.3	<i>Catalyser l'écotransition du système industriel</i>	154
6.3	L'essor du champ disciplinaire de la biologie systémique.....	155
6.3.1	<i>Une expansion possible grâce à une combinaison gagnante de hautes technologies</i>	155
6.3.2	<i>La transcriptomique et la protéomique permettent de suivre des systèmes de molécules qui varient dans le temps</i>	157
6.3.3	<i>D'autres disciplines « omiques » investiguent aujourd'hui de multiples systèmes biologiques</i>	159
6.4	L'essor du champ des technologies de l'information et de la communication.....	161
6.4.1	<i>Avec l'informatique mobile et ubiquitaire, le web 3.0 est devenu l'Internet des objets</i>	161
6.4.2	<i>Les technologies embarquées influencent la manière dont les gens vivent</i>	161
6.4.3	<i>La R&D sur les capteurs intelligents se situe à la convergence des NTIC, des cleantechs et des</i>	

<i>medtechs</i>	165
7 Investigations aux frontières de la recherche en écologie industrielle	169
7.1 Les synergies de recherche liées au champ de l'écologie industrielle	169
7.1.1 <i>La pertinence de l'écologie industrielle pour le programme Oikosmos</i>	169
7.1.2 <i>Le simulateur d'ECA : un « couteau suisse » pour l'analyse des flux de matières, de molécules et d'informations circulant au sein d'écosystèmes</i>	171
7.2 L'approfondissement des concepts, des stratégies, des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle.....	174
7.2.1 <i>Un cadre pour la consolidation du concept d'écologie industrielle</i>	174
7.2.2 <i>Un modèle pour l'écorestructuration de l'écosystème industriel</i>	176
7.2.3 <i>Un vecteur pour le développement d'analyse de flux de matières dynamiques</i>	177
7.2.4 <i>Un laboratoire pour le test, la modélisation et le développement de réseaux alimentaires « industriels »</i>	178
7.2.5 <i>Un moteur du perfectionnement de l'évaluation des impacts (méthodologie de l'analyse de cycle de vie)</i>	179
7.2.6 <i>Un support pour le développement de la notion de durabilité systémique</i>	182
7.3 Le pilotage fin des conditions écosystémiques	183
7.3.1 <i>Un instrument de perfectionnement de notre savoir sur les écosystèmes</i>	183
7.3.1.1 <i>Le suivi quasi en temps réel de cycles biogéochimiques accélérés</i>	183
7.3.1.2 <i>Le fonctionnement à une échelle « méso » de complexité</i>	184
7.3.1.3 <i>L'observation d'interactions aux interfaces « organisme - habitat - environnement »</i>	186
7.3.1.4 <i>L'exploration et le test des principes du biomimétisme en conditions extrêmes</i>	190
7.3.2 <i>Un optimiseur de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs</i>	197
7.3.3 <i>Une plateforme expérimentale de suivi de l'exposome</i>	200
7.3.3.1 <i>La maîtrise des risques biologiques et chimiques</i>	201
7.3.3.1.a <i>L'exposome</i>	202
7.3.3.1.b <i>L'écotoxicologie</i>	206
7.3.3.2 <i>L'hypermonitoring de l'exposome</i>	208
7.3.3.2.a <i>Un outil d'évaluation des risques environnementaux</i>	208
7.3.3.2.b <i>Un outil de détection : systèmes d'alerte précoce</i>	210
7.3.3.2.c <i>Un outil de mesure des expositions biologiques, chimiques et physiques</i>	212
7.3.3.2.d <i>Un outil d'analyse de la distribution des micropolluants et contaminants chimiques</i>	214
7.3.4 <i>Un régulateur de l'homéostasie des organismes et des écosystèmes</i>	216
7.3.4.1 <i>L'homéostasie des organismes</i>	217
7.3.4.2 <i>L'homéostasie des écosystèmes</i>	218
7.3.4.2.a <i>La stœchiométrie écologique</i>	218
7.3.4.2.b <i>La théorie du budget énergétique dynamique</i>	218

7.3.4.2.c	<i>Les successions écologiques artificielles</i>	219
7.3.4.2.d	<i>L'écopoïèse artificielle</i>	220
7.3.4.3	Le renforcement de la capacité d'adaptation aux changements des conditions écosystémiques.....	221
7.3.4.3.a	<i>La résilience</i>	221
7.3.4.3.b	<i>La prévision aveugle</i>	222
7.3.4.3.c	<i>L'architecture massivement parallèle</i>	223
7.3.4.3.d	<i>L'autoréparation</i>	226
7.3.4.4	Le déploiement de mesures préventives.....	226
7.3.4.5	L'application de mesures correctives (contre-mesures).....	227
7.4	Le développement de systèmes de recyclage hautement efficaces (recyclage intégral).....	229
7.4.1	<i>Un moteur du développement d'écotechnologies</i>	229
7.4.2	<i>Une installation de traitement décentralisé des déchets organiques</i>	230
7.4.2.1	La valorisation de l'or jaune contribue à un écosystème urbain durable.....	231
7.4.2.2	Le projet MASSTER : vers une démonstration du potentiel de transfert de technologie des bioprocédés de recyclage de MELISSA.....	234
7.4.3	<i>Un dispositif expérimental pour la valorisation chimique et biochimique du dioxyde de carbone</i>	241
7.4.3.1	Le dioxyde de carbone : une ressource à valoriser et non plus un déchet à capter puis à stocker.....	242
7.4.3.2	Le dioxyde de carbone : une source de carbone exploitable dans le contexte des ECA.....	242
7.4.3.3	L'écosystème artificiel strictement clos.....	246
7.4.3.4	L'écosystème clos artificiel, mais avec apport externe de CO ₂	247
7.4.3.4.a	<i>La voie biologique</i>	247
7.4.3.4.b	<i>La voie chimique</i>	248
7.4.4	<i>Le bioraffinage des coproduits de l'ECA</i>	255
8	Investigations aux frontières de la recherche en biologie systémique	263
8.1	Les synergies de recherche liées au champ de la biologie systémique.....	263
8.2	La biosurveillance et le maintien de la santé des organismes : de la génomique à la métabolomique.....	265
8.2.1	<i>L'intégration des approches omiques à la sélection génétique de l'équipage</i>	266
8.2.2	<i>L'analyse des voies de régulation et de la dynamique des génomes de l'ECA</i>	268
8.2.3	<i>L'étude des phénomènes de transfert horizontal de gènes dans l'ECA</i>	271
8.2.4	<i>L'interdépendance entre l'exposome et les processus biologiques de l'ECA</i>	272
8.2.5	<i>La métabolomique : l'analyse des effets de l'exposome sur les voies métaboliques de l'ECA</i>	275
8.2.6	<i>La recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (1/2) : de la génomique à la métabolomique</i>	277
8.2.7	<i>La physiologie de l'exercice : une approche non omique pour le maintien de l'homme en bonne santé</i>	283
8.2.8	<i>La biologie synthétique : vers la création de fonctions métaboliques sur mesure pour les ECA</i>	285

8.3	La nutrition : de la production de nourriture aux approches nutriginomique et microbiomique.	290
8.3.1	<i>Les systèmes de production, de transformation et de préparation de la nourriture : de la culture à l'assiette</i>	290
8.3.1.1	La caractérisation et la sélection des végétaux.....	291
8.3.1.2	La culture des végétaux.....	292
8.3.1.3	Le contrôle qualité des procédés et produits agroalimentaires.....	300
8.3.1.4	La préparation finale de la nourriture.....	302
8.3.2	<i>La nutriginomique : les sciences omiques pour l'optimisation de la nutrition</i>	303
8.3.2.1	Les modifications épigénomiques induites par l'exposome.....	304
8.3.2.2	La nutriginomique : l'étude de l'influence des nutriments sur nos gènes.....	306
8.3.2.3	L'alimentation fonctionnelle et personnalisée : pour une vie en bonne santé prolongée.....	309
8.3.2.4	La nutriginomique : un chaînon manquant entre séquençage et médecine personnalisée ?.....	311
8.3.2.5	La recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (2/2) : de la nutriginomique et à la médecine personnalisée.....	313
8.3.3	<i>La microbiomique : l'analyse de l'influence de la microflore commensale sur la santé des organismes</i>	319
8.3.3.1	Le microbiome et son métagénome.....	320
8.3.3.2	Les enjeux de l'écologie microbienne en ECA.....	322
8.3.3.3	La microbiomique en ECA.....	324
8.3.3.4	Les intestins artificiels.....	327
9	Investigations aux frontières de la recherche sur les technologies de l'information et de la communication	330
9.1	Les synergies de recherche liées au champ des technologies de l'information et de la communication.....	330
9.2	Les sciences computationnelles.....	330
9.2.1	<i>La modélisation mathématique des procédés de l'ECA</i>	331
9.2.2	<i>La caractérisation et l'harmonisation des données omiques de l'ECA</i>	335
9.2.3	<i>La modélisation numérique de données biologiques humaines</i>	336
9.3	Les technologies embarquées.....	340
9.3.1	<i>Le « smart monitoring » de données environnementales et de santé</i>	340
9.3.2	<i>Le « data mining » : vers une exploitation des données pertinentes pour l'homéostasie de l'ECA</i> ...	344
9.3.3	<i>Les sciences de l'interaction : vers des interfaces homme-machine conviviales et optimisées</i>	346
9.3.4	<i>La cybersécurité : vers une collecte sécurisée des données vers le « cloud » numérique</i>	350
9.4	La télésanté.....	352
9.4.1	<i>Vers une prolongation de la vie à domicile en bonne santé grâce à la télésanté</i>	352
9.4.2	<i>De la télémédecine à la télésanté : vers un élargissement de la recherche synergistique sur la santé humaine en ECA</i>	358

9.4.3	<i>La télépsychiatrie</i>	360
9.4.3.1	L'évaluation de l'état psychologique d'individus évoluant en habitat clos	361
9.4.3.2	La psychosociologie en habitat clos	362
9.4.3.3	Le suivi des relations avec le personnel d'assistance	364
9.4.3.4	La psychophysiologie de l'émotion et de la performance en habitat clos.....	365
9.4.3.5	Les actions préventives.....	367
10	Des usagers en symbiose avec leur habitat clos et durable	369
10.1	Les synergies de recherche liées à la notion d'habitat clos et durable	369
10.2	L'éco-habitat.....	372
10.3	L'habitat autosuffisant.....	375
10.4	L'habitat autonome.....	380
10.5	L'habitat sain	385
10.6	L'habitat intelligent	393
11	Considérations finales.....	395
11.1	Le renforcement de l'intégration au programme Horizon 2020.....	395
11.2	Les aspects éthiques de la vie en habitat clos.....	398
11.3	Les applications terrestres en relation avec l'étude des ECA.....	401
<u>PARTIE III : LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL : UNE</u>		
<u>PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES</u>		
<u>SYSTÈMES CLOS</u>		<u>407</u>
12	Une installation flexible et dynamique permettant une mutualisation des ressources physiques.....	410
13	Le Forum Oïkosmos : un lieu privilégié de promotion des systèmes clos.....	412
14	Le Centre de compétences Oïkosmos : un accès à une expertise complète sur les systèmes clos	415
15	L'Incubateur Oïkosmos : un catalyseur des processus d'éco-innovation.....	418
16	Une plateforme intégrative favorisant l'interdisciplinarité	422
17	Une infrastructure servant à pérenniser la recherche sur les systèmes clos	427
18	Un projet impliquant les citoyens grâce aux sciences participatives et à l'innovation ouverte.....	429

19 Considérations finales.....	435
<u>PARTIE IV : VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE ?</u>	
20 Le contexte de l'innovation en Suisse occidentale	439
20.1 Les caractéristiques générales et les atouts clés de la Suisse occidentale	439
20.2 Les structures, les organisations et les acteurs de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » de Suisse occidentale	442
20.2.1 Les institutions de recherche académique de Suisse occidentale	442
20.2.2 Les plateformes technologiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie	444
20.2.3 Les clusters de Suisse occidentale.....	446
20.2.4 Le soutien à l'innovation en Suisse occidentale	450
20.2.5 Les incubateurs et les parcs scientifiques et technologiques de Suisse occidentale.....	453
20.2.6 Les centres de recherches privés dans les hautes technologies.....	454
21 Les opportunités offertes par un simulateur d'ECA basé en Suisse occidentale.....	456
21.1 Les opportunités pour l'écosystème de l'innovation en Suisse occidentale.....	456
21.2 Les opportunités pour le secteur spatial suisse.....	462
21.2.1 La politique spatiale suisse	462
21.2.2 Les institutions de recherche du secteur spatial suisse.....	464
21.2.3 Les opportunités liées à la mise en œuvre de la politique spatiale nationale.....	465
22 Considérations finales.....	469
<u>PARTIE V : MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS</u>	
23 Les mesures d'accompagnement qui contribueraient au rayonnement du programme Oïkosmos.....	472
23.1 L'élaboration d'une politique scientifique adaptée	472
23.2 La planification adéquate de sa communication	475
23.3 L'exploitation de son potentiel pour l'éducation à la science	484
24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'Université de Lausanne.....	489
25 Conclusions générales.....	494
<u>BIBLIOGRAPHIE.....</u>	<u>498</u>

LISTES DES FIGURES

Figure 1: Consommables nécessaires aux besoins métaboliques de l'équipage et déchets associés.....	39
Figure 2: Représentation simplifiée des six compartiments de la boucle MELiSSA.	53
Figure 3: Les six compartiments de la boucle MELiSSA.....	54
Figure 4: Les ECA de type MELiSSA en tant qu'écosystèmes miniaturisés et simplifiés.....	54
Figure 5: MELiSSA s'inspire du fonctionnement d'un écosystème aquatique (lacustre).	55
Figure 6: La spiruline (<i>Arthrospira platensis</i>).	59
Figure 7: Le MELiSSA Pilot Plant (MPP).....	67
Figure 8: Vues d'artistes de FIPES (Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation).	77
Figure 9: Rôles de FIPES.....	78
Figure 10: Les thèmes de recherche du programme Oïkosmos.	168
Figure 11: Les ECA à la convergence des écosystèmes industriels et naturels.	170
Figure 12: Réaction de Sabatier.	249
Figure 13: Réaction de synthèse de méthanol par hydrogénation de CO ₂	250
Figure 14: Formation de polycarbonates.....	251
Figure 15: Les voies potentielles de production d'époxyde sur Mars.....	252
Figure 16: Synthèse de poly(uréthane-amine) à partir de CO ₂	252
Figure 17: Équation générale de la réaction entre un silicate de magnésium et le CO ₂	253
Figure 18: Panorama des voies de valorisation du CO ₂	254
Figure 19: Résumé des thématiques de recherche synergistiques sur les ECA abordées dans la Partie II du rapport.	403
Figure 20: Domaines d'application potentiels qui pourraient jaillir d'une recherche synergistique sur les ECA, et leur contexte d'utilisation.	405
Figure 21: Le programme Oïkosmos: des thématiques de recherches aux interfaces des domaines de la psychologie, la médecine, le support-vie et la biologie.	422
Figure 22: L'écosystème de l'innovation offert par la Suisse.....	441
Figure 23: Enjeux d'un simulateur d'ECA	496

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Connexions entre les champs de recherche du rapport et les concepts relatifs à la notion d'habitat clos et durable.	371
Tableau 2: Opportunités d'un simulateur d'ECA pour les parties prenantes de Suisse occidentale. ...	457
Tableau 3: Relations possibles des parties prenantes de Suisse occidentale avec le simulateur d'ECA (a) et leur phase d'intervention (b).	461
Tableau 4: Liste des participants potentiels au Comité de pilotage	493

ACRONYMES

- API : Application Programming Interface
- (B)LSS : (Biological) Life Support System (système de support-vie biologique ou biorégénératifs) ;
- BS : biologie systémique ;
- CELSS : Controlled Ecological Life Support System (système de support-vie écologique contrôlé) ;
- ECA : écosystèmes clos artificiels ;
- EI : écologie industrielle ;
- ESA : European Space Agency (Agence spatiale européenne) ;
- ESTEC : European Space Research and Technology Centre ;
- FIPES : Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation ;
- ISS : International Space Station (Station spatiale internationale) ;
- ISRU : in-situ resource utilization ;
- MELISSA : MicroEcological Life Support System Alternative ;
- MEMS : MicroElectroMechanical Systems (microsystèmes électromécaniques) ;
- OMICs : sciences omiques (génomique, protéomique, métabolomique, etc.) ;
- (N)TIC : (nouvelles) technologies de l'information et de la communication.

STRUCTURATION DU RAPPORT

Le présent rapport est composé de cinq parties :

- Partie I : Introduction, méthodologie et contexte du rapport ;
- Partie II : Le programme Oïkosmos - Synergie de recherche sur les écosystèmes clos artificiels ;
- Partie III : Le Simulateur d'écosystème clos artificiel : une plateforme scientifique et technologique de premier plan pour l'étude des systèmes clos ;
- Partie IV : Vers un Simulateur d'écosystème clos artificiel en Suisse occidentale ? ;
- Partie V : Mesures d'accompagnement, recommandations et conclusions.

Ces parties englobent vingt-trois chapitres dont la structuration est montrée à la page suivante.

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales

PARTIE I : INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

Dans sa première partie, le §1 du rapport expose le contexte spatial des missions interplanétaires habitées (§1.1). Elle aborde la conquête de l'espace par l'homme au XXI^e (§1.1.1). Puis les contraintes spécifiques des habitats spatiaux utilisés pour une exploration planétaire humaine sont introduites, tout comme les raisons justifiant qu'on puisse les considérer comme des habitats clos, soumis à de fortes contraintes (§1.1.2). Ensuite de quoi le §1.1.3 explicite la nécessité d'embarquer des systèmes de recyclage « bioinspirés » afin de relever le défi d'un bouclage de flux de matières. Enfin, le §1.2 fait un rapide survol des projets de R&D de l'Agence spatiale européenne (ESA) visant à permettre l'envoi à terme d'astronautes sur la planète Mars (MELiSSA, FIPES, Oïkosmos).

Par la suite, l'intérêt de l'Université de Lausanne pour le programme de recherche « synergistique » Oïkosmos, initié en 2006, est discuté au §2. Ce programme souhaite encourager les collaborations entre les chercheurs et les scientifiques des institutions terrestres avec ceux des domaines du spatial, dans le cadre de la préparation des missions interplanétaires habitées.

Le §3 passe brièvement en revue la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude, en particulier ses objectifs (§3.1), ses activités (§3.2), sa portée initiale (§3.3), les livrables attendus (§3.4), ainsi que l'équipe de recherche (§3.5).

Le §4 est quant à lui dédié aux écosystèmes clos artificiels (ECA). Il commence par brosser un tableau des différents systèmes de supports vie (§4.1), avec un accent sur les biorégénératifs (BLSS). Il détaille ensuite les projets de l'ESA en la matière à commencer par MELiSSA (§4.2.1), le projet d'ECA européen, qui ambitionne ultimement un recyclage quasi intégral basé sur la valorisation systématique des déchets organiques produits par un équipage d'astronautes dans le cadre d'une mission interplanétaire habitée vers Mars. Il enchaîne avec les enjeux de la préparation au sol des missions humaines vers Mars (§4.2.2.1) et la présentation du projet de simulateur d'ECA au sol de l'ESA, FIPES (§4.2.2.2). Enfin, il expose l'intérêt du programme de recherche scientifique et technologique Oïkosmos, en illustrant les raisons de son potentiel pour favoriser les synergies de recherches terrestres et spatiales sur les ECA (§4.2.3).

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales du rapport

1 Constats et contexte spatial

1.1 Les missions interplanétaires habitées nécessitent un système de recyclage quasi intégral

1.1.1 La conquête de l'espace par l'Homme au XXI^e siècle

Peut-on considérer la conquête de l'espace comme un domaine d'extension nécessaire à l'humanité ? En ce début de XXI^e siècle, les défenseurs la perçoivent en tout cas comme pertinente pour le développement de la société. Dans le cas de l'envol humain vers Mars, les grands enjeux sont 1) scientifiques et technologiques (avancement des connaissances, stimulation de la chaîne de valeur recherche-innovation-marché), 2) économiques (développement industriel de type Ariane, vastes marchés applicatifs civils), 3) géostratégiques (volets applicatifs militaires, vitrine technologique, prestige par la reconnaissance d'un statut de puissance technologique) et 4) sociétaux (source d'inspiration et d'éducation, par exemple pour encourager la relève des filières de formations scientifiques et techniques) (Pellerin et al. 2013; Bainbridge 2009). Certains justifient la colonisation de l'espace par l'homme par des raisons environnementales, industrielles, commerciales ou touristiques, parce qu'elle pourrait, entre autres, lui permettre : 1) de préserver l'environnement terrestre en déplaçant certaines activités industrielles dans l'espace, 2) de déployer des activités commerciales comme l'exploitation minière d'astéroïdes (Andrews et al. 2015), 3) de fournir des activités touristiques d'un nouveau genre (Reddy et al. 2012; Collins & Autino 2010; Seedhouse 2008) ou 4) de disséminer la vie dans l'Univers¹⁰.

Certains, comme l'éminent physicien Stephen Hawking, vont jusqu'à estimer qu'une vie humaine dans l'espace est indispensable pour assurer sa survie à long terme – et celle d'autres espèces terrestres, en témoignent également les récentes initiatives *Inspiration Mars*¹¹ et *Mars One*¹². La première vise à envoyer un équipage composé de deux Américains vers Mars en 2018 avec pour objectif une orbite autour de la planète rouge à 150 km du sol. Le projet est porté et partiellement financé par Dennis Tito – le premier touriste de l'espace (Reddy et al. 2012), en étroite collaboration avec la NASA et des poids lourds de l'aérospatial comme Paragon Space Development Corporation (Tito et al. 2013). Il démontre la tendance actuelle d'agences spatiales comme la NASA à se tourner vers des formes de partenariats public-privé pour financer des programmes d'exploration spatiale. En effet, à l'exception de la Chine, les budgets alloués par les agences spatiales à la préparation de telles missions habitées ont été drastiquement revus à la baisse ces dernières années, voire carrément supprimés, à l'image du

¹⁰ Voir présentation de Stephen Hawking sur le site de la National Space Society américaine : Why We Should Go Into Space : <http://www.nss.org/resources/library/spacepolicy/hawking.htm> (dernière consultation le 10.05.2014)

¹¹ Site web de *Inspiration Mars* : www.inspirationmars.org

¹² Site web de *Mars One* : www.mars-one.com

programme Constellation. Annulé en 2010 par Barack Obama, ce dernier prévoyait d'envoyer à nouveau des astronautes sur la Lune. Plus radical, *Mars One* envisage l'envoi pour un aller (sans retour !) d'un équipage de quatre astronautes vers Mars en 2024, financés par des activités de « crowdfunding », mais également par le biais d'un « merchandising » et la retransmission future d'une émission de TV-réalité filmant 24 heures sur 24 et 7 jours sur 7 la préparation de volontaires sur une base terrestre simulant les conditions martiennes, puis leur vie sur Mars après leur « amarsissage »¹³.

Enfin, comment ne pas mentionner l'aspiration à coloniser Mars du multimilliardaire Elon Musk, fondateur en 2002 de la société américaine *SpaceX*¹⁴. La détermination de cet entrepreneur de génie¹⁵ pourrait être décisive, tant l'établissement d'une base planétaire autonome sur Mars est devenu son obsession¹⁶. Il s'y verrait d'ailleurs bien mourir lors de ces vieux jours, comme il l'a répété à plusieurs reprises aux médias¹⁷. En gagnant en 2008 un appel d'offres de la *NASA* faisant suite au retrait planifié de la navette spatiale américaine¹⁸, *SpaceX* a réussi en un temps record à devenir le premier contractant privé à desservir la Station spatiale internationale. Le premier ravitaillement a eu lieu en 2012¹⁹, par l'intermédiaire de son cargo spatial *Dragon*²⁰ et de son lanceur *Falcon 9*²¹. En 2014, *SpaceX* a entamé la construction de son propre spaceport dans le sud du Texas. Pour établir l'homme sur Mars en vue de véritablement la coloniser, *SpaceX* a récemment démarré un projet d'envergure visant à développer d'ici une dizaine d'années le *Mars Colonial Transporter* (MCT)²², un vaisseau monumental capable de déposer cent tonnes de charge utile sur Mars (!), permettant de transporter cent personnes par voyage. Avec le MCT, la vocation de *SpaceX* est un transport Terre-Mars abordable, avec un aller simple envisagé de l'ordre de 500'000 à 1'000'000 \$²³, grâce à des composants du vaisseau réutilisables et une

¹³ Ibid.

Concrètement, la mission prévoyait initialement de déposer préalablement sur le sol martien de « rovers » (dès 2020) puis de modules (dès 2022) qui permettront notamment le déploiement de structures gonflables pour le futur habitat spatial, mais aussi la préparation des systèmes de régénération de l'eau et de l'atmosphère, avant le départ effectif de l'équipage en 2024.

¹⁴ Site web de la société SpaceX : www.spacex.com

¹⁵ Musk a également fondé des sociétés à succès tels que PayPal, Tesla et SolarCity, la vente à eBay de la première en 2002 lui a permis de faire fortune.

¹⁶ « The thing that's important in the long run is establishing a self-sustaining base on Mars », à la page 332 de sa biographie parue au printemps 2015 (Vance)

¹⁷ Ibid., page 335 « I would like to die on Mars, » he said. « Just not on impact. Ideally, I'd like to go for a visit, come back for a while, and then go there when I'm like seventy or something and then just stay there. »

¹⁸ Voir le communiqué de presse de SpaceX du 23.12.2008, « F9/Dragon Will Replace the Cargo Transport Function of the Space Shuttle after 2010 » : www.spacex.com/press/2012/12/19/nasa-selects-spacex-falcon-9-booster-and-dragon-spacecraft-cargo-resupply (dernière consultation le 07.06.2015)

¹⁹ Voir le communiqué de presse de la NASA du 07.10.2012, « First Contracted SpaceX Resupply Mission Launches with NASA Cargo to Space Station » :

www.nasa.gov/centers/kennedy/news/releases/2012/release-20121007.html (dernière consultation le 07.06.2015)

²⁰ Description détaillée du cargo Dragon : www.spacex.com/dragon (dernière consultation le 07.06.2015)

²¹ Description détaillée de lanceur Falcon 9 : www.spacex.com/falcon9 (dernière consultation le 07.06.2015)

²² Voir la page Wikipédia consacrée au Mars Colonial Transporter :

https://en.wikipedia.org/wiki/Mars_Colonial_Transporter (dernière consultation le 07.07.2015)

²³ « The thing that's important is to reach an economic threshold around the cost per person for a trip to Mars. If it costs \$1 billion per person, there will be no Mars colony. At around \$1 million or \$500,000 per person, I think it's highly likely that

architecture très simple. Toutefois, des doutes subsistent quant à la faisabilité technique des moteurs *Raptors*²⁴. N'en reste pas Musk croit intimement qu'à l'horizon 2035 des fusées spatiales emmèneront des voyageurs par milliers vers Mars, de sorte à permettre le développement d'une colonie humaine autonome²⁵. Et jusqu'à présent, force est de constater qu'avec ce personnage d'exception, rien ne semble impossible.

L'Europe n'est pas en reste. En 2001, le Conseil des Ministres de l'Agence spatiale européenne (ESA) a donné mandat à l'ESA de préparer une ambitieuse mission d'exploration du système solaire avec des vaisseaux habités : la mission Aurora. À l'horizon 2030-2050, cette mission prévoit notamment l'établissement d'une base habitée permanente sur la lune, l'exploration de quelques-uns des principaux astéroïdes, et surtout une exploration humaine de la planète Mars. Ce sont précisément les activités de l'ESA à la préparation de missions interplanétaires qui seront discutées en détail dans la présente étude.

1.1.2 Les contraintes spécifiques des habitats spatiaux pour l'exploration planétaire

De telles missions spatiales avec des équipages humains sont caractérisées par leur longue durée et une destination éloignée de la Terre (Committee on Human Exploration 1997). Elles diffèrent profondément des missions habitées effectuées jusqu'à aujourd'hui. En effet, les séjours habités traditionnels sont soit de courte durée (missions Apollo sur la lune, par exemple), soit s'effectuent à proche distance (p. ex. Station spatiale internationale²⁶, en orbite terrestre basse). Dans le premier cas, l'équipage peut emporter avec lui tous les éléments nécessaires à la survie, et dans le second, il est possible de réapprovisionner l'équipage via des ravitaillements à intervalles réguliers en cours de mission. Dans les deux cas de figure, les éléments vitaux tels que l'oxygène et la nourriture sont produits sur Terre et entreposés à bord. Une fois ces ressources vitales consommées, les déchets organiques associés (dioxyde de carbone, urine, matières fécales) sont stockés après traitement physico-chimique, avant d'être finalement ramenés sur Terre.

there will be a self-sustaining Martian colony. There will be enough people interested who will sell their stuff on Earth and move. It's not about tourism. It's like people coming to America back in the New World days. You move, get a job there, and make things work. If you solve the transport problem, it's not that hard to make a pressurized transparent greenhouse to live in. But if you can't get there in the first place, it doesn't matter. », à la page 333 de sa biographie (Vance 2015).

²⁴ « Le projet secret d'Elon Musk pour coloniser la planète Mars » paru dans LeTemps du 20.12.2015, en lien avec une conférence donnée ce jour-là à l'EPFL de Richard Heidmann, spécialiste de la propulsion du groupe Snecma et ayant travaillé sur les moteurs de la fusée Ariane : www.letemps.ch/Page/Uuid/bed9cf8e-9ff1-11e4-b189-26eecf90f1b5/Le_projet_secret_dElon_Musk_pour_coloniser_la_planete_Mars (dernière consultation le 22.01.2015)

²⁵ « Elon Musk argues that we must put a million people on Mars if we are to ensure that humanity has a future », paru dans le magazine *aeon* paru le 30.09.2014, qui résume un des nombreux entretiens donnés par Elon Musk qui abordent la question des missions humaines vers Mars : <http://aeon.co/magazine/technology/the-elon-musk-interview-on-mars> (dernière consultation le 07.07.2015)

²⁶ Voir les sites de l'ESA (www.esa.int/esaHS/iss.html) et de la NASA consacrés à la Station spatiale internationale (www.nasa.gov/mission_pages/station/main/index.html)

Les *habitats spatiaux* posent donc des défis d'envergure, avec des contraintes en termes de :

- *fiabilité* : exigences d'autonomie maximale, absence d'échappatoire ou de sortie de secours, pas de retour possible, nécessité de pratiquer des diagnostics en vol, activités de surveillance pour la détection précoce de problème potentiel, stratégies de réparations et de redondances indispensables ;
- *logistique* : pas de réapprovisionnement, réduction nécessaire de la dépendance aux produits périssables ;
- *taille* : réduction maximale de la masse et du volume, miniaturisation des équipements, afin de maîtriser les coûts de la mission ;
- *performance* : réduction des pertes, réduction de la consommation d'énergie, grande flexibilité, haute adaptabilité, durabilité.

Sans compter les challenges liés à la propulsion, à l'« amarsissage » de la navette, à la robotique, à la protection contre les radiations spatiales, aux contre-mesures des effets de la microgravité, etc. (Rapp 2007; Seedhouse 2009; Moore 2010).

1.1.3 La bioinspiration, solution pour un bouclage des flux de matières et d'énergie

De telles contraintes dictent l'objectif premier des missions d'exploration spatiale qui vise précisément à réduire la masse embarquée de consommables métaboliques nécessaires à la survie de l'équipage. En effet, au vu de l'allongement des distances et des durées, des limites techniques des lanceurs et des coûts de lancement associés, il devient impossible d'emporter à bord d'un vaisseau spatial tous les éléments nécessaires à la survie, dont la masse est considérable si aucun recyclage de la biomasse embarquée n'est prévu²⁷.

Les systèmes ouverts (c'est-à-dire sans bouclage des flux de matières et d'énergie) utilisés jusqu'ici lors de missions courtes ou non habitées deviennent prohibitifs. Ainsi, les missions humaines de longue durée posent des problèmes inédits et nécessitent par conséquent une approche très différente apportant un nouveau volet indispensable, lié à l'optimisation des processus de recyclage des déchets organiques et inorganiques. L'*ensemble* des ressources en oxygène, en eau, et en nourriture provenant du compartiment de l'équipage devra être recyclé. Il ne reste donc qu'une possibilité : produire la nourriture durant la mission, à partir des déchets de l'équipage, tout en purifiant l'eau et régénérant l'air, et ce de manière sécurisée. Dans l'idéal, cette régénération doit tendre vers un bouclage complet des flux, qu'ils soient gazeux, liquides ou solides. Or, les systèmes physico-chimiques actuels présentent des capacités

²⁷ Les missions de l'ESA prévoient plus de 120 tonnes de consommables pour un équipage de 6 personnes durant 1000 jours. Ceci inclut les eaux pour l'hygiène de l'équipage (Lasseur, 2006).

de recyclage limitées et ne produisent généralement pas de nourriture, qui plus est sur le site où sont traités les déchets, à part de manière indirecte dans les pays où l'épandage agricole des boues d'épuration est pratiqué à grande échelle²⁸.

Autrement dit, la seule solution consiste à s'inspirer du fonctionnement quasiment cyclique des écosystèmes de la Biosphère. C'est pourquoi les principales agences spatiales (NASA, JAXA, RSA, CSA) développent des projets de systèmes biorégénératifs autonomes, intégrant précisément de telles approches de « bioinspiration ». C'est également le cas de l'ESA, qui développe depuis près de vingt-cinq ans des systèmes de support-vie biologiques. De tels « écosystèmes clos artificiels » (ECA, voir §4.2.1) doivent en outre être parfaitement compatibles avec les nécessités physiologiques humaines et en particulier les impératifs nutritionnels, la flore intestinale, la microbiologie de la peau, pour ne citer qu'eux.

²⁸ En 2004, 60% du million de tonnes de matières sèches de boues de station d'épuration produites ont été épandus sur les sols agricoles français :

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/ar/272/1122/lepandage-boues-stations-depuration-urbaines-sols.html (dernière consultation le 01.04.2014)

1.2 L'Agence spatiale européenne prépare les missions spatiales habitées via les projets MELiSSA, FIPES et Oïkosmos

Si les contraintes physiques, chimiques et biologiques liées aux conditions spatiales sont considérables, elles ne semblent pas hors de portée des possibilités scientifiques et techniques actuelles. La durabilité et la stabilisation de tels systèmes de support-vie devraient pouvoir être obtenues à moyen terme. Afin de participer à l'important effort de recherche et d'expérimentation préalable encore nécessaires, l'ESA développe et/ou planifie les projets suivants :

- L'écosystème clos artificiel MELiSSA (*Micro-Ecological Life Support System Alternative*) (§4.2.1) :
 - But principal : assurer la faisabilité opérationnelle d'un écosystème clos artificiel assurant le recyclage quasi intégral sur de longues périodes (> 6 mois) ;
 - État : près de 25 ans de R&D. Installation pilote à Barcelone (*MELiSSA Pilot Plant*) de deuxième génération dès 2009.
- Le simulateur d'ECA FIPES (*Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation*) (§4.2.2) :
 - But principal : simuler au sol une mission d'exploration planétaire au sein d'une installation intégrant l'homme à un ECA de type MELiSSA, que l'on peut qualifier d'habitat clos ;
 - État : construction prévue à moyen terme (horizon 2030).
- Le programme de recherche synergistique Oïkosmos (§4.2.3) :
 - Buts principaux :
 - maximiser les synergies de recherches terrestres et spatiales dans le cadre du développement de MELiSSA et des futures activités opérationnelles de FIPES ;
 - faciliter les transferts de technologies et favoriser des retombées et applications terrestres utiles à la société, en particulier en termes de systèmes de recyclage décentralisés hautement efficaces.
 - État : différents projets en cours, dont la présente étude à l'UNIL.

2 Intérêt de l'Université de Lausanne pour le programme Oïkosmos

Parmi les domaines de recherches « terrestres », l'ESA considère l'écologie industrielle comme tout à fait pertinente pour être intégrée aux recherches « spatiales » de l'agence, en particulier pour l'étude des écosystèmes clos artificiels (ECA). À l'image de l'écologie scientifique qui étudie le fonctionnement d'un écosystème naturel, ce champ disciplinaire analyse celui d'un écosystème industriel, qui englobe l'ensemble des activités anthropiques d'extraction, de production et de consommation. Elle s'intéresse particulièrement à la composition et à la circulation des flux de matières et d'énergie et aux interactions entre les différentes populations d'« organismes » (industriels et/ou vivants) qui y évoluent et entre ces mêmes organismes et les conditions du milieu environnant. L'intérêt de l'agence pour cette approche s'est matérialisé par des collaborations de longue date entre le Dr. Christophe Lasseur, responsable du projet MELISSA de l'ESA, et des experts comme Suren Erkman, ceci dès la fin des années nonante. Devenu entre-temps responsable du groupe « écologie industrielle » à l'Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) de la Faculté des géosciences et de l'environnement, le Prof. Erkman a pu initier les premiers contacts informels dès 2006 entre la direction de l'Université de Lausanne (UNIL) et le Dr. Lasseur, afin d'évaluer des opportunités de collaborations. En 2008, la Direction de l'UNIL a démontré un enclin à financer un projet visant à explorer plus en détail le potentiel et la pertinence d'un programme de recherche synergistique tel qu'Oïkosmos pour une organisation de recherche « terrestre » classique. Cette analyse visait en particulier à identifier des opportunités de synergies que des communautés scientifiques du spatial comme celles de MELISSA pourraient déployer en collaboration avec des institutions de recherche académiques « terrestres » classiques comme l'UNIL, et en particulier dans le cadre de ses activités de recherche :

- en *environnement*, avec la Faculté des géosciences et de l'environnement ;
- en *biologie* et en *médecine*, avec la Faculté de biologie et de médecine, le Centre intégratif de génomique, et le Centre hospitalier et universitaire vaudois ;
- en *psychologie*, avec la Faculté des sciences sociales et politiques.

Dès la fin 2008, le groupe « écologie industrielle » a été chargé de mener une étude dont le présent rapport fait la synthèse. Premièrement, elle a permis la revue des thématiques, des sujets et des disciplines de recherches pertinentes pour l'étude des ECA, et également l'identification, la prise de contact et la tenue d'entretiens avec les chercheurs de l'UNIL, dans le but d'explorer la pertinence, la valeur ajoutée d'un démonstrateur au sol tel qu'un simulateur d'ECA pour mener certaines de leurs activités de recherche « terrestre », dans la perspective d'Oïkosmos. Plus largement, d'autres chercheurs issus des pôles de recherche académique (R&D fondamentale et appliquée) de Suisse occidentale ont été identifiés, contactés et/ou interviewés à l'EPFL et au CHUV, mais également au CSEM, à l'UNIGE, à l'UNINE, etc. L'agenda de recherche qui découle de cette démarche fait l'objet de la Partie II.

En parallèle, un deuxième volet du rapport a cherché à cataloguer les opportunités de collaboration offertes par le déploiement d'un simulateur d'ECA comme FIPES – celui prévu par l'ESA – pour l'ensemble des parties prenantes de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché. La Partie III détaille ces différentes opportunités de transfert de technologie, et les modalités de participation associées.

Enfin, un dernier volet de la recherche a permis d'évaluer le potentiel, l'intérêt et la pertinence de l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale pour l'écosystème de l'innovation de la région (clusters technologiques de l'innovation, acteurs du soutien à l'innovation, incubateurs, parcs scientifiques et technologiques, acteurs du secteur spatial suisse, etc.). La Partie IV présente ces opportunités de transfert de savoir et de technologie pour l'ensemble de ces parties prenantes.

Le prochain chapitre détaille la méthodologie utilisée dans le cadre de cette étude, à savoir :

- ses objectifs (§3.1) ;
- ses activités (§3.2) ;
- sa portée initiale (§3.3) ;
- ses livrables (§3.4) ;
- les ressources et l'équipe de recherche (§3.5).

3 Méthodologie du rapport

3.1 Objectifs

Dans la perspective de la construction prévue d'un simulateur d'ECA par l'Agence spatiale européenne, le travail de recherche - « le programme scientifique et technologique Oïkosmos - Synergies de recherches terrestres et spatiales sur les écosystèmes clos artificiels » -, soutenu par un financement de la Direction de l'UNIL, s'est déroulé du septembre 2008 à la mi 2014.

Le rapport de synthèse du rapport est découpé en cinq parties, dont les objectifs principaux sont récapitulés ci-après :

- *Partie I : Introduction, méthodologie et contexte du rapport* : introduire la notion d'écosystème clos artificiel, et sa pertinence dans le contexte spatial (Objectif I) ;
- *Partie II : Le Programme Oïkosmos - Synergies de recherche sur les écosystèmes clos artificiels* : formuler un agenda de recherche pour le programme scientifique et technologique Oïkosmos, cataloguant les domaines, thématiques et sujets de recherche et illustrant la valeur ajoutée pour des synergies de recherche terrestres et spatiales sur les ECA (Objectif II) ;
- *Partie III : Le Simulateur d'écosystème clos artificiel* : identifier les opportunités de transfert de savoir et de technologies offertes par un simulateur d'ECA permettant de le positionner comme une plateforme technologique de premier plan pour l'étude des systèmes clos (Objectif III) ;
- *Partie IV : Vers un Simulateur d'écosystème clos artificiel en Suisse occidentale ?*: démontrer les opportunités offertes par l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale pour son écosystème de l'innovation et pour le secteur spatial suisse (Objectif IV).
- *Partie V : Mesures d'accompagnement, recommandations et conclusions du rapport* : proposer des mesures d'accompagnement à l'ESA (Objectif V.A), émettre des recommandations et des suggestions à la Direction de l'UNIL (Objectif V.B) et enfin de conclure la présente étude.

Les activités réalisées afin d'atteindre ces objectifs sont décrites au §3.2. Quant aux livrables, ils sont récapitulés au §3.4.

3.2 Activités

Les activités de la Partie I ont consisté essentiellement en une revue de la littérature, à des recherches en ligne, ainsi qu'à la réalisation d'entretiens ciblés avec des membres de la communauté MELiSSA sur les diverses caractéristiques et fonctions des ECA (§4.1), ainsi que sur les principaux projets en cours de l'ESA y relatifs (§0).

Afin de formuler un agenda de recherche préliminaire pour le programme scientifique et technologique Oïkosmos (Partie II), les activités suivantes ont été réalisées :

- Identification de la portée préliminaire du rapport (§5.1) ;
- Catalogage des domaines favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale (§5.2) ;
- Consolidation de la portée du rapport (§5.3) ;
- Formulation d'un agenda de recherche pour le programme Oïkosmos (§5.4) en fonction du contexte terrestre actuel (§6), agenda qui fait ensuite l'objet des §7 à §10.

La principale activité de la Partie III a consisté à identifier les opportunités de transfert de savoir et de technologies offertes par un simulateur d'ECA. Les §12 à §18 cataloguent les diverses modalités d'utilisation, les activités opérationnelles et les services qu'une telle plateforme technologique pourrait proposer aux acteurs de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché.

En parallèle à la formulation d'un agenda de recherche pour le programme Oïkosmos (Partie II) et à l'identification des opportunités de transfert de technologies d'un simulateur d'ECA (Partie III), les activités de la Partie IV ont consisté à établir un panorama succinct de l'écosystème de l'innovation en Suisse occidentale (§20) et à démontrer les opportunités offertes par l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale (§21).

Sur la base des activités réalisées aux Parties I à IV, la Partie V propose des mesures d'accompagnement qui contribueraient à faire rayonner le programme Oïkosmos (§23), établit des recommandations et des suggestions à la Direction de l'UNIL (§24), avant de conclure l'étude au §25.

3.3 Portée initiale

La portée initiale du rapport reposait sur la recherche et les applications dans les domaines scientifiques et technologiques suivants :

- Médecine (télémédecine, effets de l'isolation et du confinement, résistance aux antibiotiques) ;
- Psychologie (comportement en groupe, processus de coopération) ;
- Biologie (microbiologie, physiologie végétale) ;
- Système de support-vie (fonctionnement des cycles, alimentation) ;
- Écologie industrielle (analyse de flux de matières, systèmes de recyclages efficaces).

3.4 Livrables

Les livrables du rapport comprennent :

- Un rapport d'étude en français (au format PDF) sur la base de la revue documentaire, des entretiens téléphoniques et des visites effectuées et de leur analyse subséquente ;
- Un tableau synoptique (au format MS Excel) récapitulant l'ensemble des structures, organisations et parties prenantes de Suisse occidentale identifiées (près de 400 au total) et/ou contactées (90 ont fait l'objet d'un entretien) avec leurs coordonnées principales, l'assignation de mots-clés et le renvoi aux chapitres correspondants du présent rapport ;
- Une bibliographie de plus de 450 publications sous la forme d'un dossier numérique compilant leurs PDF et leur leurs références aux formats XML, BibTex et RIS ;

3.5 Ressources et équipe de recherche

L'équipe de recherche était composée du Professeur Suren Erkman, leader du groupe « écologie industrielle » de l'Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) de la Faculté des Géosciences de l'environnement) et de Théodore Besson (responsable de recherche et assistant-doctorant). Des apports ponctuels ont été amenés par d'autres membres du groupe, en particulier par le Dr. Frédéric Meylan, le Dr. Pierre-Philippe Chappuis (collaborateurs scientifiques), Loïc Leray (assistant-doctorant), Emeline Le Pen (stagiaire), et Mathieu Breitenstein (diplômé, Msc en géosciences de l'environnement).

4 Introduction sur les écosystèmes clos artificiels (ECA)

Ce chapitre souhaite tout d'abord approfondir la notion d'écosystème clos artificiel en présentant les types de systèmes de support-vie biologique (§4.1). Les projets connexes de l'ESA seront ensuite décrits, en particulier ceux mentionnés au §0, à savoir :

- MELISSA, l'écosystème clos artificiel que l'ESA développe actuellement (§4.2.1) ;
- FIPES, le simulateur au sol que l'ESA projette de bâtir à moyen terme (§4.2.2) ;
- Oïkosmos, le programme de recherche synergistique lié à MELISSA et FIPES (§4.2.3). Ce dernier fait l'objet de l'intégralité de la Partie II de cette étude.

4.1 Les systèmes de support-vie biologiques ou biorégénératifs (BLSS)

Actuellement, les missions d'exploration envisagées de la Lune, de Mars, voire de divers astéroïdes auront des objectifs essentiellement *scientifiques*, mais potentiellement également des buts :

- *touristiques* : dans un premier temps, la destination ciblée serait l'espace circumterrestre proche. Il existe actuellement un marché ciblant des clients relativement fortunés pour effectuer des vols spatiaux suborbitaux. Des sociétés comme *Virgin Intergalactic*²⁹ (fondée et financée par Richard Branson) l'ont bien compris et ont déjà planifié de tels vols pour ces prochaines années. À plus long terme, la Lune et Mars pourraient par exemple abriter des hôtels spatiaux et autres centres de loisirs envisagés par certains. Le projet d'établissement humain d'Elon Musk exposé au §1.1.1 dans une base autonome sur Mars semble à ce titre aller bien au-delà d'un objectif purement touristique. Dans une telle perspective, les écosystèmes associés devront être beaucoup plus importants et certainement plus complexes que ceux prévus dans le cadre des premières missions scientifiques d'exploration pourvues d'un équipage humain ;
- *industriels* : les premières approches d'une prospection des ressources minérales des astéroïdes sont envisagées actuellement, tant par la NASA³⁰, que par des sociétés américaines comme Planetary Resources³¹ (fondée par Peter Diamandis, et comptant parmi ses investisseurs Eric Schmidt et... Richard Branson). Elles visent à permettre l'exploitation de matières premières, essentiellement de métaux et éléments dont certains astéroïdes sont riches (fer et métaux associés, série de l'iridium et du platine, etc.) et à leur transformation plus ou moins poussée ;
- *de surveillance* : il pourrait s'agir de disposer d'installation de stations de repérage lointain et

²⁹ Site web de Virgin Galactic : www.virgingalactic.com

³⁰ « La NASA envisage de capturer un petit astéroïde », paru dans Le Monde du 06.04.2013 : www.lemonde.fr/sciences/article/2013/04/06/la-nasa-envisage-de-capturer-un-asteroide_3155446_1650684.html

³¹ Site web de Planetary Resources : www.planetaryresources.com

d'alertes d'astéroïdes potentiellement dangereux³², ou d'effectuer des essais de destruction ou de changement d'orbites de débris spatiaux.

Comme évoqué plus haut, lorsque ces missions d'exploration impliquent le maintien loin de la Terre de groupes humains sur de longues durées, elles nécessitent alors la réalisation de systèmes spécifiques pour assurer la survie de l'équipage. De tels aménagements doivent permettre, au minimum, le recyclage de l'air, de l'eau et des déchets, mais aussi, dans la mesure du possible, la production d'une part importante de la nourriture consommée par les spationautes. La seule manière efficace d'y parvenir est d'installer et de maintenir des écosystèmes intégrés, permettant – entre autres – une production suffisante de matières végétales (et éventuellement animales), à savoir des systèmes de support-vie biologiques ou biorégénératifs (en anglais *biological / bioregenerative life support systems, BLSS*) (Skoog 1984).

La définition d'un « système de support-vie » est relativement large : c'est l'ensemble des systèmes et sous-systèmes permettant de garantir l'autonomie biologique et de maintenir l'habitabilité pour un équipage isolé de sa Biosphère habituelle et évoluant dans un environnement clos et confiné (que l'on peut considérer comme relativement hostile) pendant de longues périodes d'isolement (allant de quelques jours à plusieurs mois). Autrement dit, les BLSS spatiaux sont des systèmes qui doivent permettre à l'homme de survivre dans l'espace. Le système doit donc être viable, ou durable – techniquement – durant une mission complète. Ils visent à être exploités aussi bien dans des navettes ou des stations spatiales, que dans d'autres habitats spatiaux comme des bases planétaires (lunaires ou martiennes). Ceci implique l'intégration des multiples technologies de support-vie associées³³.

Comme le souligne Suomalainen dans son manuscrit de thèse à l'UNIL (2012), ce qui est frappant avec les BLSS est bien leur niveau d'« isolation ». Une isolation qui, sous certains aspects, peut être comparée aux îles isolées ou même au système Terre dans son ensemble : les interactions avec l'environnement extérieur sont limitées et les ressources au sein du système sont les seules facilement accessibles. Selon Deschenes et Chertow (2004), les îles sont confrontées avec les problèmes de ressources disponibles en quantité restreinte et à une fragile sécurité de leur approvisionnement, ainsi qu'à une capacité de soutien de l'environnement strictement limitée. Alors que les populations continentales sont également confrontées à ces problématiques, elles doivent être abordées plus urgemment dans les systèmes insulaires lorsque l'atteinte d'un développement durable est cruciale. Autrement dit, tandis qu'à

³² Voir les activités du Near Earth Object Programm de la NASA : <http://neo.jpl.nasa.gov>

³³ Au sujet des missions humaines vers Mars, Richard Heidmann, de l'Association Planète Mars, déclare que « nous avons d'ores et déjà en main la quasi-totalité des briques technologiques nécessaires à la réalisation de l'édifice ; nous savons ce qu'il faut faire et comment le faire. » Et d'ajouter que « les préoccupations écologiques et la conscience de la finitude des ressources de la Terre ne peuvent que renforcer l'attention que mérite ce grand projet (...) l'impératif d'une gestion parcimonieuse et efficiente des ressources et des déchets de l'expédition, avec des taux très élevés de recyclage [aura] des retombées directes dans l'équipement de nos habitations et de nos villes » (Pellerin et al. 2013, p.207).

l'échelle d'un continent terrestre, les préoccupations en matière de durabilité concernent sur un futur plus ou moins lointain, les décisions prises dans un système insulaire influencent immédiatement sa durabilité (Deschenes & Chertow 2004). La situation est encore plus restrictive pour les ECA spatiaux, puisque les ressources directement exploitables sont la plupart du temps disponibles en quantité extrêmement limitée et pour lesquels la capacité de soutien du système est un facteur limitant. La durabilité dans l'espace est étroitement reliée à la survie de l'équipage, ce qui est également le cas pour les systèmes insulaires, mais ceux-ci sont souvent entourés de ressources abondantes, mais difficilement exploitables. Les durées en jeu dans les missions interplanétaires se déroulent également à une échelle un peu plus longue. Cependant la situation change lorsque des ressources permettant d'approvisionner le BLSS peuvent être extraites de l'environnement extraterrestre (Mars, par exemple), par utilisation des ressources *in situ*.

Les systèmes de support-vie fournissent les conditions nécessaires au maintien des fonctions naturelles du corps humain. Ils peuvent être classés en deux catégories :

- *les non-régénératifs* : des systèmes ouverts basés sur l'épuisement progressif de consommables, et qui n'incluent pas les procédés de recyclage. Ils sont généralement physico-chimiques ;
- *les régénératifs* : des systèmes fermés (ou quasi fermés) qui font circuler les flux de matières de manière à pouvoir boucler tout ou partie d'entre eux. Ils sont généralement biologiques ou hybrides (physico-chimiques et biologiques).

4.1.1 Les systèmes de support-vie non-régénératifs (physico-chimiques)

Dans de tels systèmes *ouverts*, la matière s'écoule continuellement dans le système d'une entrée (source de stockage ou de réapprovisionnement) vers une sortie (déchets stockés, voir rejetés dans l'environnement extérieur). Les technologies mises en jeu dans de tels scénarios ont recours à des procédés physico-chimiques qui vont consommer des ressources jusqu'à leur épuisement. Généralement plus simples et faciles à gérer que les systèmes biologiques ou hybrides, ces types de systèmes sont utilisés depuis le début des vols spatiaux ou orbitaux habités. Néanmoins, ils ont l'inconvénient d'augmenter linéairement la quantité des ressources à embarquer, avec l'allongement de la durée des missions. En pratique, leur limite de capacité tend ainsi à être rapidement dépassée et donc irréalisable tant d'un point de vue technique qu'économique.

4.1.2 Les systèmes de support-vie régénératifs (biologiques ou hybrides)

Les systèmes régénératifs font quant à eux circuler les flux de matières (oxygène, eau et/ou nourriture)

de manière à ce qu'ils soient susceptibles d'être recyclés, c'est-à-dire afin d'être à même de fermer les boucles (systèmes *fermés* ou *quasi fermés*). Les besoins initiaux sont remplis à partir de ressources prises sur Terre, puis les déchets produits sont recyclés.

Contrairement à la plupart des systèmes physico-chimiques, les sous-systèmes biologiques peuvent couvrir plusieurs fonctions de support-vie : les plantes et les algues sont capables de régénérer l'air et l'eau, en plus de produire de la nourriture, alors que le processus non biologique de Sabatier n'est utile que pour la réduction du CO₂ et peut être couplé à l'électrolyse pour générer de l'oxygène, afin de régénérer l'air. Ajoutons que l'utilisation d'un composé biologique peut nécessiter l'utilisation d'un autre : une chambre de culture de plantes nécessite par exemple des nitrates, produits à partir de l'ammonium par des bactéries nitrifiantes d'un bioréacteur, l'ammonium provenant lui-même de la dégradation de l'urée par un troisième compartiment.

Théoriquement, un système clos au sens strict est physiquement impossible, puisqu'un apport d'énergie est nécessaire pour équilibrer la conversion entropique de l'énergie en chaleur irrécupérable (Brooks & Wiley 1986). Cependant, si l'on considère l'énergie provenant d'une source comme le soleil comme faisant partie du système, il peut être considéré comme fermé sur le point de vue des flux de matières et donc autosuffisant, c'est-à-dire sans apport externe d'énergie non renouvelable (énergie fossile, nucléaire, etc.) (Graedel 1996). Plus le système est *clos* (c'est-à-dire plus les taux de recyclage sont élevés), plus les besoins en réapprovisionnement sont réduits.

Depuis longtemps, on sait recycler quasi indéfiniment l'air et l'eau dans les vaisseaux spatiaux, au moyen de techniques physico-chimiques. À long terme, les consommables et en particulier la nourriture constituent le véritable facteur limitant. Selon le Dr. Christophe Lasseur, qui dirige le projet MELISSA de l'ESA (détaillé au §4.2.1), les besoins métaboliques quotidiens pour une mission spatiale sont de l'ordre de 5 kg/jour/personne, soit 30 tonnes de consommables (eau de boisson, nourriture, oxygène) pour une mission de 1000 jours composée d'un équipage de 6 membres. En ajoutant l'eau d'hygiène (15 kg/jour/personne), on atteint la valeur « astronomique » de 120 tonnes (Figure 1). En admettant 80% de recyclage physico-chimique, il reste au minimum 24 tonnes à emporter. *Energia*, un des plus puissants lanceurs sur le marché, peut déposer sur la Lune une charge utile de l'ordre de 30 tonnes (dont une part significative est le carburant de retour !)³⁴, alors que Soyouz, qui met en orbite basse les équipages de la Station spatiale internationale possède quant à lui, une charge utile de 7 tonnes. Avec l'abandon du programme Constellation de la NASA en 2010 et l'arrêt du développement des lanceurs ARES IV (charge utile en orbite lunaire de 24 tonnes) et ARES V (charge utile en orbite lunaire de 71 tonnes)³⁵, on comprend facilement que le recyclage des nutriments devient un élément indispensable

³⁴ Pour des informations complémentaires sur Energia:

www.energia.ru/english/energia/launchers/vehicle_energia.html

³⁵ Voir la page Wikipédia dédiée à Ares V: http://en.wikipedia.org/wiki/Ares_V

afin de ne pas faire exploser les budgets de telles missions.

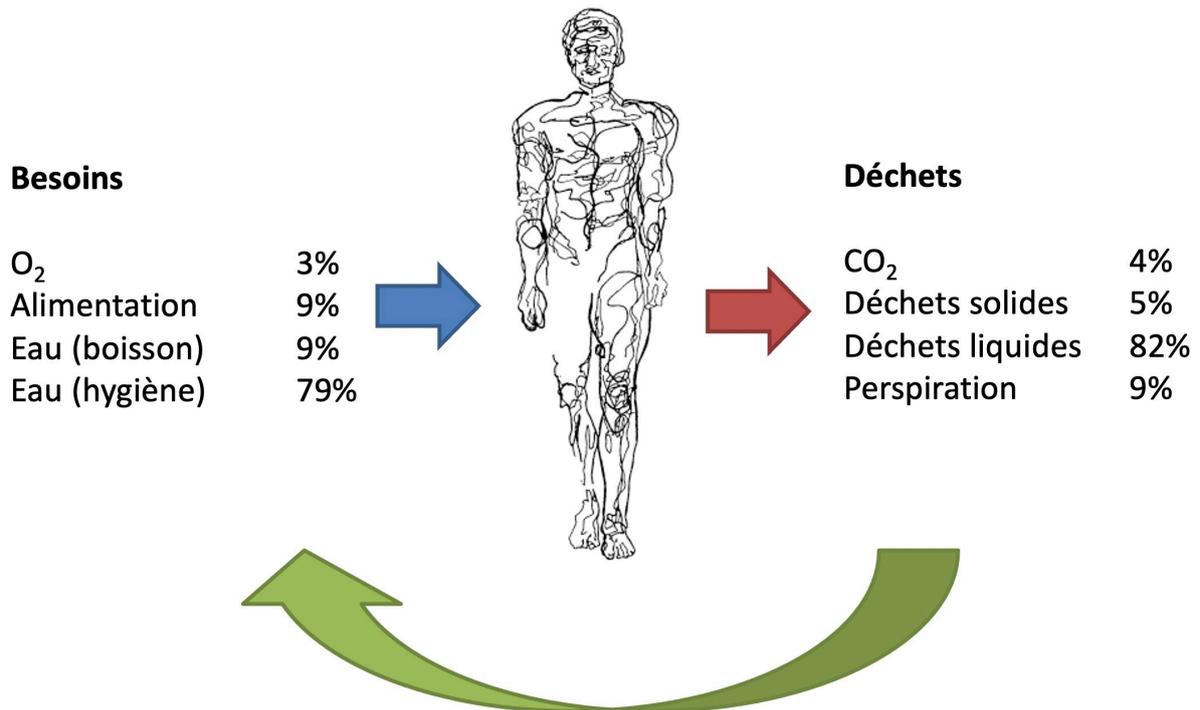


Figure 1: Consommables nécessaires aux besoins métaboliques de l'équipage et déchets associés.

Les consommables nécessaires aux besoins métaboliques de l'équipage (oxygène, aliments et eaux de boissons) ainsi que les eaux d'hygiène représentent de l'ordre de 20 kg/jour/personne, soit plus de 120 tonnes pour une mission de 1'000 jours avec 6 astronautes. Au vu des coûts exorbitants de lancement de matériel en au-delà de l'orbite terrestre basse (LEO), on comprend aisément la nécessité d'opérer un BLSS pour transformer les déchets organiques de l'équipage (gaz carbonique, matières fécales, urine et eau contenue dans les airs exhalés et celle évaporée par la peau (perspiration)). Source: Dr. Christophe Lasseur, ESTEC, ESA.

La combinaison adéquate de systèmes de supports vie physico-chimiques et biologiques

Le revers de la médaille est que les systèmes biologiques ont le désavantage de nécessiter d'embarquer une plus grande quantité de matériel que les systèmes physico-chimiques pour le traitement et le recyclage des déchets (besoins énergétiques, procédés de maintenance et de contrôle de la température, etc.).

Jusqu'à présent, un bouclage complet des flux de matières n'a jamais été réalisé au moyen d'un BLSS spatial, étant donné que certaines des technologies de support-vie nécessaires sont soit encore en développement ou ne sont pas suffisamment matures, alors que d'autres sont sous-dimensionnées pour soutenir un équipage complet, sachant que des dispositifs comme l'ISS n'offre souvent pas les volumes nécessaires pour de tels équipements. Dès lors, un ravitaillement (ou un stockage) et/ou des processus physico-chimiques ont toujours été nécessaires. C'est pourquoi les technologies des systèmes clos pour les fonctions régénératrices des systèmes de maintien de vie dans l'espace incorporent généralement à la fois des procédés physico-chimiques et biologiques et sont appelées systèmes de support-vie *hybrides*.

Pour des raisons pratiques et afin de limiter sa complexité et sa taille, un écosystème artificiel complètement fermé peut difficilement être obtenu en utilisant uniquement des éléments et processus biologiques mis bout à bout, de sorte que les sous-systèmes physico-chimiques s'avèrent quasi obligatoires. Relevons que dans la Biosphère elle-même, les cycles biologiques à grande échelle sont liés aux cycles géologiques et hydrologiques.

La génération d'eau potable à partir d'eaux usées est un exemple typique, qui résulte d'activités biologiques (ex : diminution de la charge organique et minérale) et physico-chimiques (ex : filtration naturelle). Dans les écosystèmes clos artificiels, des processus similaires doivent être transposés.

Pour les missions de transfert vers une base planétaire, certaines des fonctions de support-vie seront fournies par des techniques physico-chimiques, principalement en raison de la faible place disponible à bord de la navette. Si les techniques biorégénératives seront probablement de moindre importance pour de telles missions, elles rempliront par contre une fonction majeure au sein de bases lunaires ou planétaires. Toutefois, les techniques physico-chimiques auront probablement toujours un rôle de « backup ». En effet, en cas d'effondrement d'un bioréacteur, les systèmes physico-chimiques à cycle de vie court sont pertinents, car redémarrables rapidement.

Sur Mars, les techniques biorégénératives et physico-chimiques seront certainement utilisés de manière obligatoire dès l'arrivée de l'équipage, en combinant adéquatement les deux types de processus, tout en incluant une surveillance appropriée des conditions environnementales à l'intérieur de l'habitat.

En plus de fonctions d'approvisionnement en oxygène, eau et nourriture, les BLSS peuvent donc être également utilisés à d'autres fins, comme pour la régulation de la température, de la pression et de l'humidité de la cabine. Pour ce faire, les processus biologiques sont combinés avec d'autres, chimiques ou physico-chimiques. Ces fonctions peuvent être complètement séparées ou alors plus ou moins étroitement entrelacées. En outre, puisque les technologies biologiques et les systèmes de biorégénération associés vont fortement interagir avec d'autres fonctions de support-vie physico-chimiques, leur intégration réciproque devra être étudiée en profondeur le plus en amont possible de leur développement.

Enfin, relevons que l'utilisation des ressources in-situ (en anglais : in-situ resource utilization ou ISRU), qui regroupe les techniques permettant de produire des consommables à partir des matériaux trouvés sur place pour produire certains des consommables utiles à la mission, pourrait avoir à jouer pour approvisionner les BLSS en oxygène ou fournir des matériaux de construction (Moses & Bushnell 2017). L'ISRU sera discuté aux §7.4.3.4 (apport de gaz carbonique aux BLSS) et §7.4.4 (production de carburants).

Les caractéristiques d'un BLSS

Selon Eckart (Eckart 1997) et Suomalainen (2012), les BLSS spatiaux sont caractérisés par :

- leur isolation, leur degré de fermeture/clôture extrême, voire totale ;
- leur (relative) simplicité ;
- leur espace et masse limités ;
- leur haute fiabilité et leur fonctionnement stable ;
- l'échelle temporelle réduite à laquelle leurs cycles opèrent ;
- la quantité limitée de ressources à leur disposition et la difficulté de leur réapprovisionnement en ressources, impliquant une nécessaire autosuffisance.

Un système de support de vie biologique ou « biorégénératif » peut être conçu à la base sur les cycles biologiques créés par l'activité combinée d'un groupe d'individus humains et des organismes suivants : 1) des plantes supérieures, 2) des micro-organismes non végétaux tels que des bactéries, des levures et des champignons, 3) des (micro-)algues et dans une moindre mesure, 4) des animaux.

Pour remplir ces fonctions de soutien, les BLSS spatiaux sont également caractérisés par leur capacité à :

- fournir la nourriture nécessaire à la survie de l'équipage ;
- remplir les fonctions :
 - de recyclage de l'atmosphère ;
 - de traitement des déchets ;
 - de traitement et de recyclage de l'eau.
- effectuer un recyclage hautement efficace et efficient impliquant respectivement :
 - la plus faible consommation d'énergie possible ;
 - le plus faible approvisionnement en ressources possible.
- être sans danger, fiable et contrôlable ;
- protéger l'équipage d'un environnement hostile (radiations, vide, extrêmes de température). Cette fonction dépend généralement des aspects structurels propres à l'habitat spatial.

Les BLSS sont des écosystèmes artificiels, qui recréent à l'échelle miniature les cycles de matières de la Terre et son atmosphère, dans des conditions hautement contrôlées, avec des horizons de temps immédiats³⁶. Leurs activités de recyclage se focalisent en particulier sur le carbone, l'hydrogène l'azote,

³⁶ Voir le document « Les Écosystèmes Clos Artificiels » de l'Agence spatiale Européenne, disponible en ligne: <http://ecls.esa.int/ecls/attachments/MELiSSA-Phase5/education/ecosystemes.pdf> (Dernière consultation le 20.05.2012).

le sulfure et le phosphore³⁷ des éléments qui constituent 95% de la matière organique à recycler. Un objectif supplémentaire de ces écosystèmes clos artificiels consiste à pouvoir également recycler les éléments en trace et autres micropolluants avec la plus grande efficacité possible.

Les procédés d'un BLSS

Afin de maintenir en vie l'équipage, les principaux sous-systèmes d'un BLSS typique assurent les fonctions suivantes :

- Air :
 - contrôle de la composition globale et des constituants de l'air dans l'habitacle ;
 - régulation de la pression ambiante ;
 - détection des incendies ;
 - maintien de la température et de l'humidité dans certaines limites bien définies.
- Biomasse :
 - production de biomasse comestible, stockage des récoltes ;
 - régénération couplée de l'air et de l'eau.
- Alimentation :
 - transformation et préparation finale des produits bruts agricoles et des ingrédients en aliments consommables ;
 - stockage des produits alimentaires préparés.
- Déchets :
 - récolte des déchets organiques de l'habitat (biomasse non comestible, déchets humains, etc.), ainsi que des emballages, etc.
- Eau :
 - collecte et traitement des eaux usées, en particulier des eaux jaunes provenant de la collecte d'urine, des eaux grises issues des douches et éviers (hygiène, préparation de la nourriture) et des eaux noires (collecte des matières fécales) ;
 - récupération, stockage, transport et approvisionnement en eau potable pour la consommation et l'hygiène de l'équipage.

Les *procédés physico-chimiques* en jeu incluent les filtres, les séparateurs physiques ou chimiques, les procédés d'oxydation ou de concentration par exemple. Bien compris, maîtrisés et relativement compacts, ces procédés sont actuellement utilisés dans les systèmes de support-vie dans l'espace et sont

³⁷ *ibid.*

également prévus pour les missions de transfert vers Mars (Czupalla et al. 2004). Leur avantage est qu'ils demandent relativement peu de maintenance et qu'ils présentent des temps de réponse rapide. Par contre, certains procédés physico-chimiques consomment beaucoup d'énergie et aucun d'entre eux ne peut recycler la nourriture.

Les *procédés biologiques (ou biorégénératifs)* utilisent les organismes vivants – plantes, animaux ou micro-organismes (champignons, bactéries, algues) – pour produire ou dégrader la matière organique. Ils requièrent souvent des volumes de fonctionnement importants et une maintenance régulière. Malgré des temps de réponse longs, ils ont néanmoins l'intérêt d'être une source potentielle de nourriture, comme souligné auparavant. Par rapport à bien des approches physico-chimiques, les BLSS ont l'avantage de la polyfonctionnalité (Sychev et al. 2003).

Pour digérer les déchets non comestibles végétaux, il est indispensable de pouvoir casser la liaison β 1-4 de la cellulose, le polymère principal composant les parois des cellules végétales, constituées de plusieurs centaines à milliers de D-glucose. Les micro-organismes dotés de cellulases ont la capacité à scinder cette cellulose, et d'initier une série de réactions enzymatiques permettant l'assimilation de glucose pour différent usage : cet hexose peut ensuite être consommé (lorsqu'il est contenu dans la nourriture), mais aussi servir à la production de biocarburant.

La même problématique est valable pour la dégradation des molécules de lignine, issues des composés lignocellulosiques qui donnent leur rigidité aux plantes, mais qui sont mal dégradés par la plupart des BLSS. Les champignons, en particulier les levures sont de bons candidats. Toutefois, ces processus nécessitent de greffer des équipements et des infrastructures spécifiques supplémentaires (système de bioprocessing, biomonitoring des organismes impliqués dans le traitement des déchets, etc.), amenant de son lot de nouvelles contraintes, en termes de masse, de taille, d'énergie, etc.

Différents critères peuvent être considérés pour la classification des systèmes biorégénératifs : la production et l'utilisation de la biomasse, le taux de recyclage des éléments et le fonctionnement dynamique (incluant le contrôle) du système.

Parmi les catégories principales de BLSS, classées par leur porteur de projet respectif et décrites dans les sections suivants, on retrouve :

- les systèmes de support-vie écologiques contrôlés, déployés, entre autres, par la NASA (§4.1.3) ;
- les systèmes à grande échelle, comme celui du projet *Biosphere 2* , financé par l'homme d'affaires américain Ed Bass (§4.1.4) ;
- les « écosystèmes clos artificiels » (ECA), à l'image du projet MELiSSA de l'Agence Spatiale Européenne (§4.2.1).

4.1.3 Les systèmes de support-vie écologiques contrôlés (CELSS)

Historiquement, la NASA a entrepris plusieurs projets de recherche visant à reproduire certains des cycles biogéochimiques terrestres afin de fournir des fonctions de support-vie lors de futures missions spatiales, en développant des systèmes de support-vie écologiques contrôlés (ou CELSS, de l'anglais « controlled ecological life support system ») (Volk 1996). Ce type de programme de R&D fondamentale et appliquée avait pour objectifs de répondre aux exigences de telles missions en termes de réduction de masse et de volume et s'est concentré sur :

- des agroécosystèmes basés sur des chaînes alimentaires simplifiées, composées de végétaux (producteurs), d'humains (consommateurs) et de micro-organismes (décomposeurs) ;
- un design visant à optimiser la productivité des cultures végétales par le biais 1) de conditions d'ensoleillement élevées, 2) de conditions de culture en hydroponie, 3) de taux de dioxyde de carbone élevé, 4) de cultures couplées à une sélection génétique 5) ainsi qu'en présence d'autres facteurs environnementaux contrôlés ;
- des modélisations mathématiques permettant d'atteindre les objectifs fixés 1) en établissant des compromis, 2) en analysant la croissance et le développement des cultures expérimentales et 3) en montrant comment augmenter le rendement des cultures (indice de récolte) via des modèles de cultures modifiés.

Selon MacElroy (1987), « le concept de CELSS est basé sur les processus naturels de recyclage qui se produisent dans l'environnement terrestre ». Il s'agit ici de créer un écosystème exploitable par l'homme et capable de fournir des fonctions de support-vie à un équipage, en reproduisant artificiellement les cycles de matières similaires à ceux se déroulant dans la Biosphère au sein de petits systèmes fermés (Kliss et al. 2003). Cependant, un CELSS ne peut être considéré directement comme un analogue d'écosystème terrestre, car son volume et la taille de ses réservoirs de matières sont minuscules, et le taux de renouvellement des cycles matériels sont nettement plus rapides vu le nombre limité de compartiments et les dimensions réduites du système (§7.3.1.1). Ces caractéristiques exigent que le système soit hautement artificialisé et contrôlé. La notion de « petitesse » du système est ici cruciale, car elle implique un usage efficace de la masse, de l'énergie et du volume pour tous les systèmes spatiaux.

Les CELSS peuvent être basés sur la culture de plantes supérieures 1) comme source de nourriture (Zabel et al. 2016) ; 2) avec pour fonction principale de régénérer de l'atmosphère en produisant de l'oxygène à partir du dioxyde de carbone expiré par l'homme (projets de type *BIOS 1* et *BIOS 2*) (J. I. Gitelson et al. 2004). Pour une revue des projets de systèmes écologiques clos, signalons une publication de Nelson et al., systèmes qu'ils qualifient de « biosphériques » (2010).

4.1.4 « Biosphere 2 », un système clos à grande échelle

Un CELSS est centré avant tout sur l'homme – c'est-à-dire que l'humain en constitue l'« espèce clé » (Cristancho & Vining 2004) –, en témoignent les expériences menées dans le démonstrateur russe *BIOS 3* (Sychev et al. 2003), ainsi qu'aux États-Unis démarrées dès la fin des années huitante dans *Biosphere 2* (Allen et al. 2003).

En particulier, le site expérimental de *Biosphere 2* a été construit par *Space Biosphere Ventures* entre 1987 et 1989 pour reproduire un écosystème clos artificiel dans le désert de l'Arizona. Avec un volume de plus de 200'000 m³ sur plus de deux hectares, cette immense structure avait pour but de tenter de recréer une biosphère dans un dôme scellé, nommé « Biosphère 2 », car considérant la Terre comme la « Biosphère 1 ». Deux expériences ont été menées au début des années nonante par de petits groupes de scientifiques évoluant sans approvisionnement avec l'extérieur lors de deux missions, de respectivement deux ans et six mois (Allen et al. 2003). Il s'agissait de réaliser des compartiments reproduisant des milieux analogues biomes terrestres, en prévision de colonisations spatiales futures. Pour ce faire, différents écosystèmes continentaux, aquatiques et marins ont été reconstitués (désert, savane, forêt tropicale, etc.) (Nelson et al. 1993).

L'établissement de telles Biosphères à grande échelle, comprenant des serres dotées de plusieurs dizaines d'espèces végétales (dont des comestibles comme la pomme de terre, le riz et la banane) et de quelques espèces animales (insectes pollinisateurs, animaux d'agrément et producteurs d'aliments : volaille, ovins, etc.), a nécessité une machinerie importante pour assurer les conditions environnementales adéquates à la croissance des cultures de plantes et à l'élevage des animaux. L'objectif visé d'autarcie alimentaire de *Biosphere 2* demandait un effort significatif des chercheurs en cours de mission, en particulier pour l'exploitation et l'entretien des écosystèmes, ainsi que la préparation, la transformation et le stockage de la nourriture.

Parmi les principales difficultés rencontrées durant les deux premières expériences, signalons des problèmes d'équilibre atmosphérique et écologique (Dempster 2008) :

- la teneur en oxygène a parfois baissé de façon alarmante : des injections d'oxygène ont été nécessaires ;
- les taux de CO₂ ont fluctué significativement : des dispositifs absorbeurs de CO₂ ont été introduits dans l'enceinte ;
- la photosynthèse semble avoir été insuffisante, potentiellement en raison de périodes d'éclairement trop faibles ;
- une partie du CO₂ semble avoir été absorbée par le béton des structures et des dalles ;
- les fluctuations de la composition de l'air ont entraîné la disparition d'une partie de la faune (essentiellement des vertébrés).

On a parfois reproché des participants à ces expériences une forme d'écologie militante, voire un manque de rigueur scientifique. Toutefois, si les écosystèmes dans leur ensemble étaient probablement insuffisamment contrôlés, l'ingénierie générale du système a été globalement une réussite. *Biosphere 2* reste encore aujourd'hui une référence incontournable d'écosystème clos de grande taille.

Biosphere 2 a permis de tirer de riches enseignements ont sur les BLSS à grande échelle :

- les flux d'airs ne sont pas suffisants pour éviter les altérations de la qualité de l'atmosphère. Le maintien de la composition atmosphérique est nettement plus aisé par le biais de systèmes simplifiés combinant des végétaux supérieurs et des algues microscopiques ;
- les flux de matières doivent être contrôlés et ajustés aux différentes activités opérationnelles ;
- le recyclage complet des déchets organiques (humains et animaux) est réalisable en reproduisant divers mécanismes naturels ;
- la production d'aliments variés en quantité suffisante en système clos est possible ;
- un nombre très limité d'espèces animales doit être introduit dans un premier temps ;
- la réalisation d'équilibres proies-prédateurs est extrêmement difficile à obtenir ;
- le sol ajoute une complexité significative. Le contrôle de l'activité des micro-organismes symbiotiques du sol est crucial. L'humus de certains sols naturels de la serre, dont la flore microbienne qui n'était pas suffisamment monitorée, ont vu leur teneur en carbone baisser significativement, suite une métabolisation plus rapide que prévue de cet élément, entraînant une consommation d'oxygène et un dégagement de gaz carbonique ;
- un système d'ingénierie physico-chimique de secours (système de back-up) doit être prêt à prendre le relais en cas de mauvais fonctionnement de la serre ;
- une approche globale est indispensable, afin d'envisager le succès de l'intégration progressive de systèmes techniques et l'exploitation durable de telles installations ;
- ces systèmes doivent intégrer des composants techniques et biologiques (BLSS hybrides).

Les expérimentations s'y sont déroulées ont montré que les difficultés deviennent considérables à surmonter, à mesure que les volumes et la biodiversité du système augmentent³⁸.

Les deux missions successives de *Biosphere 2* ont fait l'objet de nombreuses publications – dont certaines encore récemment – qui sont pertinentes dans la perspective des ECA (Engel & H. T. Odum 1999; Allen et al. 2003; Dempster 2008; Nelson et al. 2009). Il ressort de ces publications que les biosphères analogues à grande échelle sont une opportunité pour l'étude de phénomènes biologiques complexes et pour celle d'interactions ayant lieu entre des systèmes biologiques et technique, qui

³⁸ Pour une revue des challenges écologiques de tels systèmes clos, consulter notamment l'article de Nelson et al. (2013).

nécessitent de disposer :

- d'une réserve suffisante de matières premières et d'éléments chimiques ;
- d'une réserve génétique adéquate (souches, graines, plantules, semences, œufs, embryons, etc.) pour maintenir la biodiversité souhaitée ;
- d'un système d'entretien et de réparation hautement efficace et perfectionné, doté d'une capacité de fabrication de pièces détachées ;
- d'un système de contrôle informatique de l'ingénierie et de la biologie d'une extrême fiabilité, doté d'une multitude de capteurs chimiques, physiques et biologiques ;
- dans un contexte spatial (base planétaire), il s'agit également 1) d'assurer une gravité suffisante et 2) de protéger les organismes des rayonnements ionisants.

Dès 1995, la gestion de *Biosphere 2* a été confiée à l'Université de Columbia jusqu'en 2003, notamment pour étudier les effets du réchauffement climatique sur les écosystèmes, en manipulant les taux de CO₂. Aujourd'hui exploité par l'Université d'Arizona, le site accueille différents projets en lien avec cette problématique³⁹. De leur côté, les pionniers « biosphériens » ont poursuivi des expérimentations sur les systèmes de support-vie, mais à plus petites échelles (quelques centaines de mètres carrés de cultures de plantes) et sans intégrer l'homme, par exemple dans l'installation modulaire *Laboratory Biosphere* à Santa Fe au Nouveau-Mexique, à des fins pédagogiques et de recherches (Nelson et al. 2008).

4.1.5 Les agences spatiales privilégient les écosystèmes simplifiés, plus facilement maîtrisables

Au-delà des difficultés rencontrées dans les expériences de *Biosphere 2*, notons la problématique plus large liée à la faculté de l'homme de pouvoir recréer des écosystèmes clos artificiels à grande échelle. Un des enjeux consiste à former des ensembles complexes, mais restants suffisamment stables et résilients, de par leur capacité de biorégénération et d'adaptation à leur environnement biophysique direct. Pour développer de telles infrastructures à grande échelle, l'effort de recherche devient considérable, tout comme les moyens financiers, intellectuels et en temps. Ainsi, il semble préférable d'effectuer au préalable un certain nombre d'expérimentations à plus petites échelles.

Le risque d'instabilité prévisible de *Biosphere 2* pourrait ainsi expliquer que la NASA ne se soit pas investie dans le projet. Les agences spatiales ont en effet privilégié de leur côté une approche plus traditionnelle qui passe prioritairement par des systèmes dotés d'une biodiversité simplifiée (Kliss et al.

³⁹ Voir le site officiel de Biosphere 2 : <https://biosphere2.org> (dernière consultation le 07.07.2020).

2003) et d'une taille plus adéquate pour assurer à la fois 1) une maîtrise des contraintes extrêmes, 2) un suivi étroit de la performance – quasiment en temps réel – et 3) la réalisation de contre-mesures en cas de problèmes majeurs qui n'auraient pu être détectés précocement.

Dans la perspective de la mise au point par l'homme de futures « Biosphères X » de petite taille, un compromis doit être trouvé entre le développement de mini-écosystèmes simplifiés à l'extrême – et dont la faible biodiversité limite à certains égards la résilience –, et celui de méga-écosystèmes de type *Biosphere 2*, potentiellement trop instables de par leur considérable complexité.

Aux États-Unis, les efforts ont été consacrés principalement sur les CELSS. L'approche microbiologique ne semble n'avoir jamais sérieusement été envisagée, malgré leur utilité pour le traitement des déchets solides et liquides (Garland 2007). En revanche, cette voie a été explorée depuis longtemps en URSS, notamment par Joseph Gitelson (I. I. Gitelson et al. 1989), à l'Institut de biophysique de la branche sibérienne de l'Académie russe des sciences, à Krasnoïarsk. Plus récemment, des travaux ont commencé dans ce domaine au Japon (groupe du Prof. Keiji Nitta, Institute for Environmental Sciences, Aomori, Tokyo) (Nitta 1999), et dès 1987 en Europe, notamment par l'initiative de Français Claude Chipaux et Daniel Kaplan de MATRA Espace, de Max Mergeay (SCK-CEN, centre d'étude de l'énergie nucléaire civile) et de Willy Verstraete de l'Université de Ghent {Mergeay:tu}. Ces pionniers ont initié les activités qui allaient devenir le programme nommé MELiSSA de l'Agence spatiale européenne (ESA) dès 1989, dont le BLSS servira de référence dans le cadre de cette étude.

Finalement, relevons que par analogie, un système de support-vie biorégénératif peut être comparé à un écosystème au sein duquel matière et énergie s'échangent entre les différents sous-systèmes qui le composent et qui interagissent ensemble (Pechurkin & Shirobokova 2001). C'est une des raisons pour lesquelles le présent rapport a choisi d'utiliser principalement l'appellation d'écosystèmes clos artificiels (ECA) tout au long des chapitres suivants, puisque cette notion renvoie également à celles de systèmes de support-vie écologiques contrôlés (CELSS) ou biologiques (BLSS).

4.2 Les projets de l'Agence spatiale européenne liés aux ECA

4.2.1 Le système de support-vie MELiSSA : l'ECA européen pour le recyclage des déchets organiques de missions spatiales habitées

4.2.1.1 *L'ESA, une organisation couvrant l'ensemble des domaines du spatial*

L'Agence spatiale européenne (European Space Agency, ESA) est une agence intergouvernementale fondée au milieu des années septante. Elle est chargée de la coordination des projets spatiaux de 19 pays européens⁴⁰. Les activités de l'Agence comprennent notamment : l'astrophysique, l'exploration robotique du système solaire, le développement de lanceurs, l'observation de la Terre, la navigation par satellites (programme Galileo), le développement de technologies spatiales. Elle dispose d'un budget annuel de près de 4 milliards d'Euros financés par l'Union européenne et les contributions proportionnelles au PIB de chaque pays membre. La Suisse est membre fondateur de l'ESA et contribue à hauteur de 3.4% du budget de l'ESA en 2020.

Ses près de 2'000 collaborateurs sont répartis entre son siège administratif parisien et ses autres sites principaux, à savoir a) l'ESTEC (European Space Research and Technology Centre) aux Pays-Bas : conception et test des engins spatiaux et activités de développement technologique, et b) l'ESOC (European Space Operations Centre) en Allemagne : suivi et contrôle des missions en cours, qui utilisent l'ESTRACK (European Space Tracking), un réseau mondial terrestre d'antennes paraboliques assurant la liaison avec les engins spatiaux). De plus, l'ESA exploite les installations du CNES – l'agence spatiale française – (centre de lancement de Kourou) pour le lancement de ses fusées.

L'ESA participe à des programmes initiés par d'autres agences spatiales. Concernant les vols habités, elle collabore à la Station spatiale internationale.

Démarré en 2001, le programme européen ELIPS (European Programme for Life and Physical Sciences in Space) utilise la Station spatiale internationale ou d'autres navettes non habitées pour la recherche fondamentale et appliquée sur les sciences du vivant et de la physique dans l'espace. ELIPS fixe des objectifs qui couvrent en partie ceux du projet Oïkosmos qui fait l'objet du §4.2.3 et de la Partie II, à savoir l'exploration de la nature, l'amélioration de la santé, les procédés et les technologies innovants et la protection de l'environnement.

Quant à lui, le programme Aurora⁴¹ de l'ESA consiste en une série de missions spatiales ayant pour but

⁴⁰ Voir la page Wikipédia dédiée à l'ESA : http://fr.wikipedia.org/wiki/Agence_spatiale_européenne (dernière consultation le 02.06.2014)

⁴¹ Voir la page web dédiée à Aurora sur le site de l'ESA : www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Exploration/The_European_Space_Exploration_Programme_Aurora (dernière consultation le 02.06.2014)

l'étude du système solaire et en particulier de la planète Mars, afin de stimuler l'émergence de nouvelles technologies et d'inspirer les jeunes européens en leur faisant regagner de l'intérêt pour la science et la technologie. Le but final du programme est de participer à l'élaboration d'une mission humaine vers Mars dès les années 2030. L'ESA prépare de telles missions habitées de longue durée en développant des « systèmes de support-vie » biorégénératifs et les technologies associées. C'est dans ce contexte que s'inscrivent les activités du projet MELiSSA⁴² que l'ESA pilote depuis près de vingt-cinq ans, dont l'acronyme signifie « Micro-Ecological Life Support System Alternative », soit littéralement « alternative de support-vie micro écologique ». Les activités de MELiSSA Pilotées par l'ESA depuis près de vingt-cinq ans et financées . En Europe, la majorité des travaux de recherche sur les ECA ont été effectués dans le cadre de MELiSSA. Ce dernier est dirigé par la Section Thermal and Environmental Control Section (TEC-MCT) de l'ESTEC et le Dr. Christophe Lasseur, un ingénieur électronicien, en est le coordinateur. Financé par l'ESA, via une contribution annuelle proche sept millions d'Euro, le projet MELiSSA est basé sur un programme de développement qui met en collaboration un consortium européen réunissant quatorze membres⁴³, composé principalement des groupes de recherches et également soutenu par des expertises de différents réseaux de scientifiques, d'ingénieurs et d'industriels européens. Relevons que l'Université de Lausanne a intégré le consortium pour la période 2015-2019 (voir Partie V).

Les activités du projet MELISSA se déploient au sein de chacune des cinq phases non successives qui découpent classiquement les projets de l'Agence spatiale européenne⁴⁴, à savoir :

- Recherche et développement (Basic R&D, phase 1) ;
- Expérience préliminaire en vol (Preliminary flight experiments, phase 2) ;
- Ingénierie spatiale et démonstration au sol (Space engineering and ground demonstration, phase 3) ;
- Transfert de technologie (Technology transfer, phase 4) ;
- Éducation et communication (Education and communication, phase 5).

Dès 2019, la Suisse fait partie des trois principales nations contribuant au projet MELiSSA via le programme EXPERT, avec une contribution de près 4 millions de francs suisses pour la période

⁴² Voir les pages web dédiées à MELiSSA sur le site de l'ESA : www.esa.int/SPECIALS/Melissa/

⁴³ Les membres du consortium pour la période 2010 à 2014 comptaient les institutions suivantes: 1) ESA/ESTEC (Noordwijk, Pays-Bas), 2) Vlaamse Instelling voor Technologisch - VITO (Mol, Belgique), 3) IPStar B.V. (Pays-Bas), 4) Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand, France), 5) Universitat Autònoma de Barcelona (Barcelone, Espagne), 6) University of Guelph (Canada), 7) University of Gent (Belgique), 8) StudieCentrum voor Kernenergie SCK/CEN (Mol, Belgique), 9) SHERPA Engineering SA (Paris, France), 10) University of Mons (Belgique), auxquelles s'ajouteront 11) la Fondation MELiSSA (Bruxelles, Belgique), 12) l'Université de Lausanne (Suisse), 13) l'Universita' degli Studi di Napoli Federico II et 14) EnginSoft S.p.A. pour la période 2015-2019.

⁴⁴ Voir le site web de MELiSSA : www.esa.int/SPECIALS/Melissa/SEMOMBV681F_0.html

ministérielle en cours (2019-2021), selon les chiffres communiqués par le Dr. Christophe Lasseur de l'ESTEC-ESA, qui coordonne le projet depuis 30 ans.

4.2.1.2 *La fonctionnalité principale de MELiSSA vise à régénérer et à valoriser les déchets organiques*

MELiSSA est un exemple de système de support-vie régénératif doté des caractéristiques décrit au §4.1.2. Il s'agit d'un ECA composé d'une série de compartiments interconnectés dans lesquelles évoluent respectivement les membres de l'équipage, des bactéries, des micro-algues et des plantes supérieures, horticoles et comestibles (Lasseur et al. 1995; Lasseur et al. 2011). Ce BLSS forme ainsi un mini réseau alimentaire⁴⁵, c'est-à-dire que la quasi-totalité des déchets produits par une des espèces en présence est utilisée par au moins une autre. L'écosystème a pour objectif ultime de fonctionner en ne faisant intervenir aucun échange de flux de matières avec une quelconque partie extérieure au système. Néanmoins, ce dernier reste ouvert énergétiquement.

Il est prévu que tout ou partie de MELiSSA soit utilisé lors de missions interplanétaires habitées (transfert et base martienne) ou d'autres missions spatiales de longue durée sur des bases lunaires par exemple. Dans cette perspective, il devra fournir à l'équipage de multiples fonctionnalités, la plupart essentielles et indispensables à leur survie (§4.1), mais aussi à l'accomplissement et à la réussite de leur mission. Concrètement, le système doit assurer en particulier :

- *l'approvisionnement* de l'équipage en eau (eau de boisson, eaux pour l'hygiène), en oxygène et en nourriture (essentiellement de la biomasse végétale) ;
- *le recyclage, la régénération et/ou la valorisation* des déchets organiques (matières fécales, parties non comestibles des plantes), de l'air (CO₂ expiré) et des eaux usées (y compris l'urine).

Le projet MELiSSA doit permettre de répondre à de nombreux challenges en termes de contrôle, de processus, de stabilité, de sécurité, de robustesse, etc. La maîtrise de ce types de contraintes nécessite l'utilisation de nombreuses technologies fiables et innovantes, permettant de suivre (surveiller) méticuleusement l'ensemble des paramètres vitaux de l'homme et des autres organismes en présence, mais aussi le milieu environnant. De ce fait, l'expertise de MELiSSA repose sur une vaste palette de spécialistes pour couvrir des domaines extrêmement variés, allant de la recherche fondamentale en biologie aux applications industrielles automatisées. Afin d'illustrer certaines des thématiques de recherches en question, citons 1) la microbiologie, le génie chimique et l'ingénierie des systèmes

⁴⁵ Voir le reportage d'Euronews « Un écosystème de poche » posté sur YouTube le 18.10.2009 : www.youtube.com/watch?v=qmJNjSc-Mjc (dernière consultation : le 23.06.2015)

(connaissance des systèmes de contrôles prédictifs pour les bioréacteurs industriels), 2) les aspects relatifs à la biosécurité et ceux liés au monitoring et au sensing en temps réel, 3) les procédés de gestion et de traitement des déchets organiques ou encore 4) les procédés de traitement des eaux (technologies de nitrification).

MELiSSA est caractérisée par une structure compartimentée et son approche « bottom-up » orientée « système ». L'étude et le développement de la boucle MELiSSA s'effectuent par étapes successives, à savoir :

- l'étude théorique et expérimentale de chaque compartiment (souches; métabolismes; procédés; performances) indépendamment des autres ;
- le développement des modèles et simulations des compartiments ;
- le développement des systèmes de contrôles pour les compartiments ;
- l'analyse des performances de la boucle pour différentes configurations (scénarios).

Parmi les priorités récentes de R&D de MELiSSA, relevons :

- la caractérisation microbienne du compartiment I ;
- le contrôle du compartiment III (nitrificateur) ;
- la caractérisation des cultivars, incluant la modélisation du métabolisme ;
- la validation des modèles de transition du nitrate à l'ammonium ;
- la caractérisation de la chaîne alimentaire ;
- le suivi des éléments en trace ;
- la séparation des phases ;
- l'impact du stress et le potentiel d'évolution des compartiments.

Afin de surmonter les nombreux défis techniques liés à ce type d'écosystèmes (Tikhomirov et al. 2007), d'importants développements technologiques sont nécessaires. Plusieurs de ces solutions technologiques développées ont déjà une application et participe à la résolution de certains des problèmes environnementaux actuels de notre planète. Elles portent sur l'optimisation des systèmes de traitement et d'épuration des eaux usées (eaux grises, jaunes et noires), le recyclage des déchets, la croissance contrôlée des cultures, pour ne citer que quelques exemples.

Le développement du projet MELiSSA a fourni des résultats scientifiques importants (près de 250 publications dans des revues scientifiques, voir une sélection des d'articles revus par des pairs et la recherche associé de 1992 à 2016, et les actes de conférence pertinents d'un point de vue historique à l'annexe XX), ayant permis une forte progression dans la connaissance et la compréhension des écosystèmes artificiels fermés.

4.2.1.2.a Les organismes des compartiments de la boucle MELiSSA

Le concept de la boucle MELiSSA est composé en tout de six « compartiments » (Figure 3, Figure 2) :

- le compartiment I (liquéfaction) (§4.2.1.2.b) ;
- le compartiment II (photohétérotrophe) (§4.2.1.2.c) ;
- le compartiment III (nitrification) (§4.2.1.2.d) ;
- les compartiments IVa et IVb (photosynthèse) (§4.2.1.2.e) ;
- l'habitat de l'équipage à proprement parler (voir le §4.2.2.2 sur le simulateur d'ECA).

Ensemble, ces compartiments forment un écosystème simplifié et miniaturisé (Figure 4). La boucle se base sur le fonctionnement d'un écosystème aquatique (Figure 5). Les souches microbiennes et les espèces végétales de MELiSSA ont été soigneusement sélectionnées en fonction des propriétés cataboliques de leurs enzymes, leur biosécurité, ou encore de leur valeur nutritive.

Après plus de 25 ans de recherches, la faisabilité de chacun des compartiments de MELiSSA a pu être démontrée de sorte qu'aujourd'hui, la faisabilité de recyclage de l'ensemble des compartiments a pu être simulée.

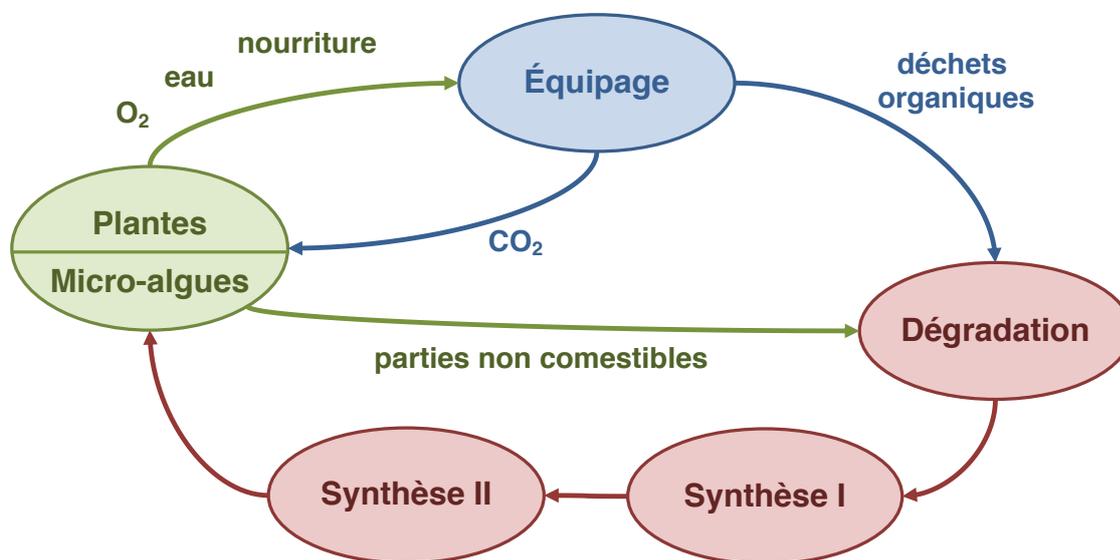


Figure 2: Représentation simplifiée des six compartiments de la boucle MELiSSA.

Le système de support-vie biologique est composé de *micro-organismes (CI, CII, CIII)*, de *plantes supérieures (CIVa)*, de *micro-algues (CIVb)* et de *l'homme (V)*.

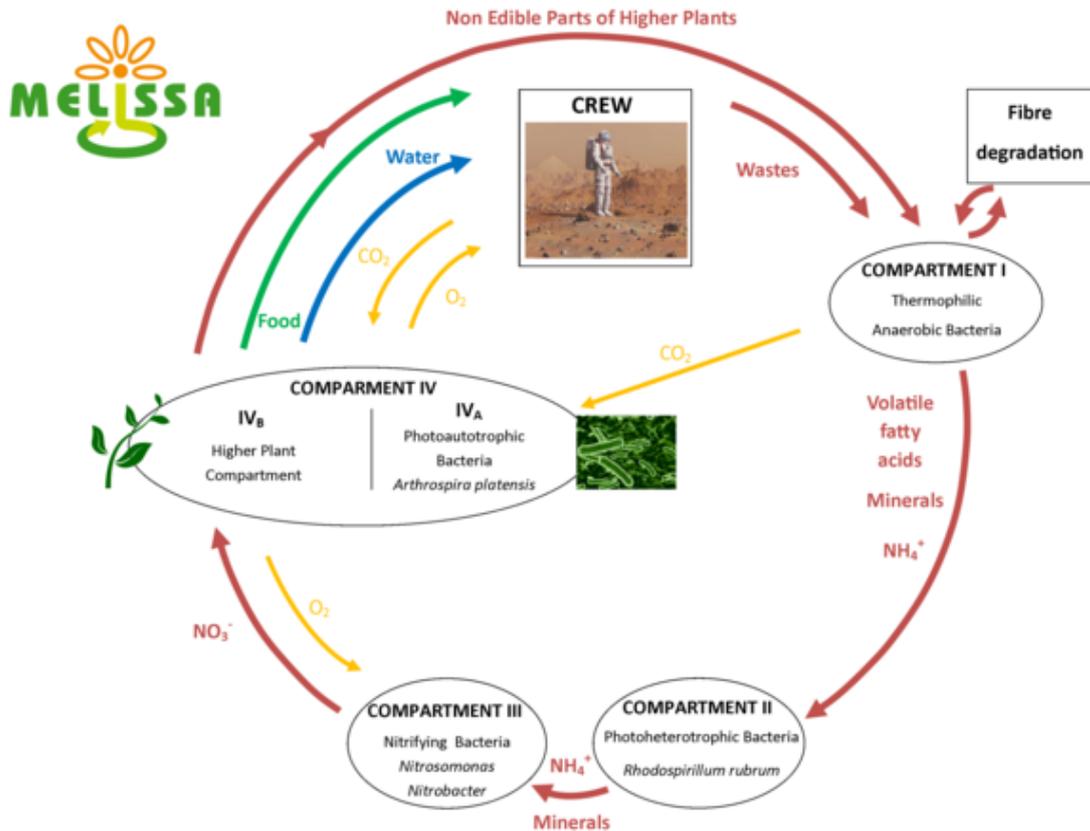


Figure 3: Les six compartiments de la boucle MELiSSA.

MELiSSA consiste premièrement en un compartiment « consommateur » (V), c'est-à-dire l'habitacle où vit l'équipage, auquel s'ajoute un système de quatre petits bioréacteurs biologiques classiques (I, II, III, IVa), ainsi qu'une chambre de culture pour végétaux supérieurs (IVb). Compartiment I: dégradation des déchets organiques et solubilisation par des bactéries thermophile anoxygénique; compartiment II: dégradation de composés carbonés par des bactéries photohétérotrophes; compartiment III: nitrification par des bactéries nitrifiantes; compartiment IVa: production de nourriture et d'oxygène par des bactéries photosynthétiques; compartiment IV: production de nourriture, d'oxygène et d'eau par des plantes supérieures; compartiment V: lieu de vie de l'équipage.

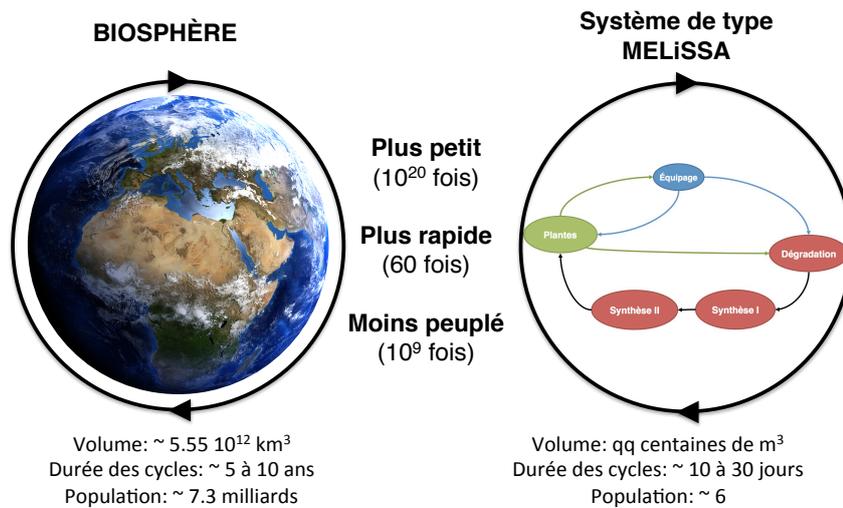


Figure 4: Les ECA de type MELiSSA en tant qu'écosystèmes miniaturisés et simplifiés.

Source: ESA, adapté d'un rapport interne de MELiSSA, transmis par Christophe Lasseur (2014).

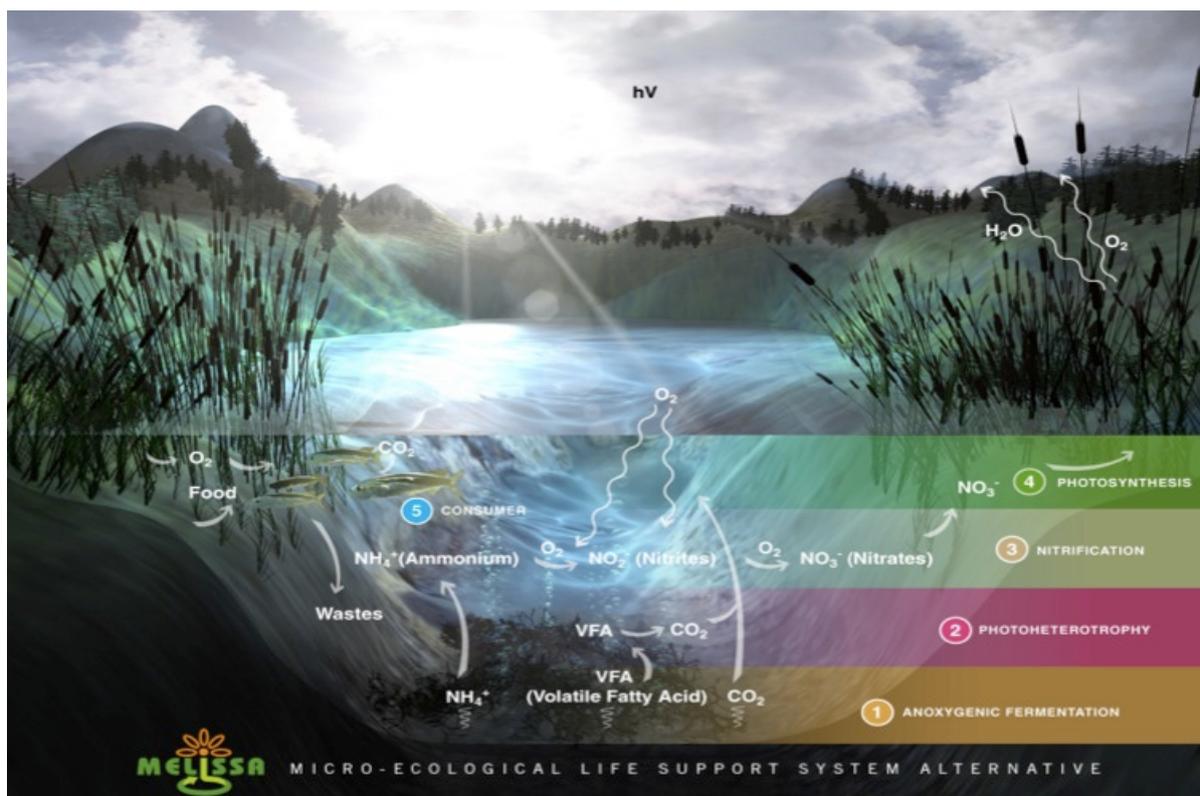


Figure 5: MELiSSA s'inspire du fonctionnement d'un écosystème aquatique (lacustre).

Les couches d'un tel écosystème (du fonds vers la surface) sont composées séquentiellement d'organismes remplissant des fonctions suivantes: 1) fermentation anoxygénique, 2) photohétérotrophie, 3) nitrification, 4) photosynthèse. Ces activités métaboliques correspondent à celles des compartiments de l'écosystème artificiel MELiSSA correspondants. Source: ESA.

4.2.1.2.b Le compartiment I (liquéfaction)

Le premier compartiment (Compartiment I - Liquéfacteur) est chargé de traiter les déchets produits par l'équipage. Le choix des micro-organismes s'est porté sur un consortium de souches anaérobies. Pour des raisons de biosécurité, le bioréacteur opère en conditions thermophiliques. Ses bactéries assurent la dégradation des déchets organiques liquides et solides (papier, fèces, urine, etc.), ainsi que des parties non comestibles issues des espèces végétales des compartiments IVa et IVb (composés de racines, de tiges, etc.). Leur action consiste à scinder les protéines, les sucres et la cellulose par transformation enzymatique - respectivement par protéolyse, saccharolyse et cellulolyse - pour donner une soupe riche en acides gras volatiles de faible poids moléculaire (des micromolécules comme le lactate, l'éthanol, l'acétate, le formate, le propionate et le butyrate), de l'ammonium, de l'hydrogène du CO₂, ainsi que des minéraux. La digestion anaérobie convertit en trois étapes la matière organique en produits finaux stables, à savoir par hydrolyse, acidogénèse et méthanogénèse. Relevons que chacune de ces étapes implique son propre consortium bactérien.

Le compartiment liquéfacteur est une des clés de l'optimisation du recyclage des déchets de la boucle

MELiSSA. En effet, il détermine la fraction des déchets organiques qui pourra être recyclée par la boucle. Il fonctionne à 55°C (conditions thermophiliques) ou à pH 6 pour éviter la production de méthane. Le temps de rétention dans un bioréacteur est un processus clé dans la biodégradation des déchets végétaux. Par exemple, une biodégradation des macromolécules (cellulose, hémicellulose, etc.) est caractérisée par un rendement de l'ordre de 20% après un jour, alors qu'il peut atteindre près de 60% après vingt jours (Volk 1996). Le temps de rétention recommandé est d'au minimum dix jours pour que la dégradation des plantes récoltées soit maximale, ou alors d'un jour si l'objectif principal est de fournir des nutriments inorganiques avec le rapport volume/masse du bioréacteur le plus petit possible.

Le recours à des souches anaérobies strictes permet ici d'économiser du précieux oxygène, qui serait sinon métabolisé par les bactéries. De plus, l'astuce de ce compartiment, grâce à un réglage fin de la température et de l'acidité, consiste à éviter la formation de méthane, qui séquestrerait inutilement du carbone au sein de l'ECA. Il s'agit d'une économie de carbone qui pourra en échange être disponible pour générer de la biomasse. De plus, le brûler reviendrait à consommer inutilement de l'oxygène.

Le choix d'un consortium de souche bactérie s'explique une meilleure efficacité en termes de biodégradation des fibres (de l'ordre de 50%) et des protéines (de l'ordre de 70%). L'amélioration des rendements est limitée par la lente dégradation du matériel fibreux (lignine, xylane, cellulose, etc., voir § 4.1.2) et par la difficulté mécanique d'extraire les composés non dégradés pour un traitement plus spécifique et adapté. Il pourrait être couplé à d'autres technologies biologiques pour améliorer le rendement de sa fonction de biodégradation. L'ESA conduit plusieurs études sur l'amélioration de la dégradation des fibres végétales. En effet, ce matériel lignocellulosique « récalcitrant » n'est pas dégradé suffisamment puisque les enzymes de la ligninolyse, comme la cellulase, ne sont pas codés par le génome des bactéries du compartiment I. Les technologies à l'étude (ou celles étudiées puis abandonnées) incluent l'oxydation supercritique, l'emploi de champignons, de bactéries provenant des ruminants, ou l'appel à des bactéries hyperthermophiles. Certains micro-organismes, en particulier les champignons xylophages et les levures, sont par exemple capables de digérer entièrement le complexe lignine - hémicellulose - cellulose et ainsi d'améliorer la valeur nutritive des matériaux lignocellulosiques. Ils permettent ainsi d'améliorer la dégradation des parties non comestibles des plantes et représentent également une source de minéraux intéressante (Rivas et al. 2000).

Les applications industrielles spécifiques à ce compartiment incluent 1) la gestion des déchets (meilleure décomposition), 2) la production de boissons, 3) le traitement de l'eau, 4) la production de nourriture, 5) l'enrichissement des sols (fertilisation avec des coproduits), 6) les biocarburants (production de biogaz par digestion anaérobie) et 7) les technologies PCR (Lasseur 2013).

4.2.1.2.c Le compartiment II (photohétérotrophe)

Les acides gras volatiles et l'ammoniaque sont ensuite introduits dans le deuxième compartiment (Compartiment II – Photohétérotrophe anoxygénique). Une membrane permet la séparation des déchets non biodégradés, ce qui est essentiel pour des raisons de sécurité pour éviter la contamination bactérienne des autres bioréacteurs. Ce deuxième compartiment poursuit la dégradation des déchets organiques produits par le premier compartiment. Les organismes sélectionnés pour cette fonction sont des Athiorodaceae (bactéries pourpres non sulfureuses) capables de croître en absence d'oxygène et en présence de lumière). Les souches *Rhodobacter capsulata* et *Rhodospirillum rubrum* ont été choisis pour l'inoculation, au vu de leur efficacité métabolique (diversité des substrats assimilables) et de leur valeur nutritive qui les rend intéressants comme complément alimentaire. À ces deux espèces capables de métaboliser l'hydrogène, est associée une bactérie pourpre sulfureuse, *Thiocapsa roseopersicina*, pour assimiler le H₂S et participer au cycle du soufre de l'écosystème. Les micro-organismes utilisant également la lumière comme source d'énergie et métabolisent les produits de dégradation provenant du premier compartiment : ces derniers sont alors transformés en protéines microbiennes dotées d'une valeur nutritive, qui leur confèrent la possibilité d'être utilisés comme une première source d'aliments.

Les applications industrielles propre à ce compartiment touchent des domaines comme 1) les plastiques biodégradables, 2) les énergies renouvelables, 3) la résistance aux radiations (au niveau microbien), 4) l'alimentation animale, 5) l'utilisation de coproduits pour la fertilisation, 6) la formation d'ATP et 7) le traitement des eaux usées (Lasseur 2013).

4.2.1.2.d Le compartiment III (nitrification)

Le troisième compartiment (Compartiment III - Nitrificateur) est un maillon essentiel du cycle de l'azote sur lequel est basé l'écosystème. L'urée produite par l'équipage est tout d'abord réduite en ammonium (NH₄⁺) par les deux premiers compartiments. Dans la foulée, le compartiment III oxyde l'ammonium en nitrate (NO₃⁻), une forme d'azote assimilable par les végétaux du compartiment suivant. Il s'agit d'une source d'azote favorable aussi bien aux plantes supérieures qu'à la spiruline (*Arthrospira platensis*). Les deux étapes de nitrification sont réalisées successivement par *Nitrosomonas* (NH₄⁺ → NO₂⁻) et *Nitrobacter* (NO₂⁻ → NO₃⁻). Dans son principe, ce procédé de nitrification est similaire à celui utilisé dans les stations d'épuration des eaux usées. L'hydrodynamisme est un facteur important pour le bon fonctionnement du compartiment, puisque ce bioréacteur fonctionne en lit fixe (« fixed bed reactor »). Les souches de *Nitrosomonas* sont immobilisées sur un support en perles de polystyrène de 4 mm de diamètre de type *Biostyr*® (voir §4.2.1.4).

Les applications industrielles du compartiment incluent 1) le traitement des eaux usées, 2) le raffinage (réduction du contenu en ammonium des déchets) et 3) les technologies PCR (Lasseur 2013).

4.2.1.2.e Les compartiments IVa et IVb (photosynthèse)

Le quatrième compartiment (photosynthétique) est composé de deux parties distinctes, le compartiment IVa (photoautotrophique) et le compartiment IVb (compartiment des plantes supérieures, « higher plant compartment » / HPC en anglais).

Compartiment IVa

Le premier remplit deux macrofonctions cruciales pour le BLSS, à savoir la production de biomasse (nourriture) consommable par l'équipage et d'oxygène pour la régénération de l'air. Pour le compartiment IVa, plusieurs types de micro-algues ont été envisagés, dont certains tels que *Chlorella* avaient déjà été testées comme élément d'un système de support-vie (Pisman et al. 1999; Pisman et al. 2000). Lehto et al. (2006) ont résumé les études spatiales portant sur la culture d'organismes photosynthétique (plantes et micro-algues) en condition de faible illumination, de faible pression et en présence de concentration accrue de CO₂, afin d'évaluer leur compatibilité avec l'environnement martien. Les auteurs positionnent également les cyanobactéries comme des candidats de choix pour démarrer un processus de Terraformation, capables de croître dans des conditions proches de celles sur Mars. Pas étonnant dès lors que le choix s'est fixé sur la spiruline, *Athrospira platensis* (Figure 6), une cyanobactérie⁴⁶ comestible qui, en plus de pratiquer la photosynthèse dans les conditions précitées, présente des valeurs nutritives et d'acceptabilité comme source de nourriture par l'équipage.

En plus de son utilité au processus de traitement de l'urine (C. Yang et al. 2008), les avantages de la spiruline sont nombreux : une composition équilibrée en protéine, la présence d'acides gras essentiels, de minéraux et de vitamines (y compris B12), une grande digestibilité et biodisponibilité de micronutriments comme le fer, le zinc, le sélénium et de surcroît, aucune toxicité décrite jusqu'ici. Autre débouché potentiel : cette algue est perçue comme un réservoir de molécules actives biologiquement. Elle contient notamment la phycocyanine, un pigment bleu qui présente une activité anti-inflammatoire pour les douleurs articulaires. Des extraits de polysaccharides contenus dans la spiruline ont également démontré *in vivo* des actions antivirales et hépatoprotectrices, elle a donc un rôle d'alicament pour l'équipage des missions spatiales. De plus, les micro-algues permettent la production d'huiles naturelles et d'amidon⁴⁷.

Il y a deux grands designs basiques dans la production de cette micro-algue, les cultures ouvertes (où la culture est exposée à l'atmosphère) (Jourdan 2018) et les systèmes fermés (dans des photobioréacteurs de type MELiSSA). Dans les cultures ouvertes, elle joue un rôle de fixateur de carbone (23 tonnes de

⁴⁶ Pour un résumé des généralités des cyanobactéries, voir les publications d'Antenna Technologies (Falquet & Hurni 2006).

⁴⁷ Ibid.

CO₂ par hectare et par an)⁴⁸. De plus, elle est bon marché (environ 10\$ sont nécessaires pour nourrir un enfant en Inde durant une année), efficace (un gramme par jour est suffisant pour améliorer le développement physique et la performance cognitive), simple à utiliser (avec des investissements bon marché), est économe en eau (avec des besoins dix fois inférieurs à une culture végétale classique), ne nécessite pas de sol fertile, peut être stockée pendant de longues périodes sans perte de qualité et est facilement assimilable, mais sans cuisson. Le perfectionnement de la première méthode est arrivé à la limite pendant les années nonante. Ils se caractérisent par la baisse de productivité, la facile contamination, la difficile récupération des produits dans les milieux dilués et le difficile contrôle de la température. C'est pour cela qu'aujourd'hui l'étude et implantation de photobioréacteurs est plus commune. Ces systèmes permettent d'établir des cultures de haute densité cellulaire. Les principaux avantages de la culture en photobioréacteurs sont les suivants : 1) une facilité pour l'obtention de la biomasse, 2) un maintien de la culture sans contamination et 3) un meilleur contrôle des conditions de la culture. Pour une croissance d'*Arthrospira Platensis* dans des conditions spatiales, Cogne et collègues (2005) prévoient une séparation automatisée des gaz, un monitoring de la pression et du pH et une mesure de la densité optique, avec des outils développés pour mesurer les cinétiques de croissance dans des conditions de microgravité dans un photobioréacteur totalement scellé.



Figure 6: La spiruline (*Arthrospira platensis*).

La spiruline est une cyanobactérie comestible d'une taille de l'ordre de 0.1 mm (longueur: 250 μ m, diamètre: 6 μ m). Elle se présente comme de minuscules filaments verts enroulés en spires. Cette micro-algue possède toute une série de caractéristiques qui la rendent idéale pour la culture en ECA : capacité à être cultivée dans des conditions se rapprochant de celles de Mars, valeur nutritives et acceptabilité comme source de nourriture élevées, possibilité de la combiner à des processus de traitement de l'urine, contenu riche en molécules bioactives, etc. Source: ESA.

La Spiruline présente un court cycle de vie, allant de 7 heures à un ou deux jours selon les conditions de culture. Ceci est précieux pour la sécurité et la fiabilité du système dans son ensemble, puisqu'une culture de micro-algues peut être rapidement relancée après un incident ou une perturbation (par

⁴⁸ Ibid.

exemple en cas de contamination des cultures ou de problème dans la surveillance de la performance). Le nombre de cellules doit être suffisamment élevé pour assurer une fiabilité et une résilience au système, permettant un retour rapide à la normale suite à la mort d'une partie de la population (Sychev et al. 2003).

Compartiment IVb

Quant au compartiment IVb, il remplit principalement une fonction de production de nourriture, même s'il joue également un rôle non négligeable dans le recyclage de l'atmosphère (production de O₂ / consommation de CO₂) et de l'eau purifiée (par évapotranspiration). S'il augmente les performances de recyclage et offre une nourriture plus variée à l'équipage (Gros et al. 2002), soulignons qu'il produit cependant une quantité significative de biomasse non comestible (feuilles, racines, tiges). La fermeture de la boucle n'est atteignable que si ces déchets organiques végétaux produits sont suffisamment recyclés. En outre, le compartiment est également responsable de la production d'un excédent d'O₂ et nécessite un approvisionnement supplémentaire en CO₂. Afin de réduire les flux entrants de la boucle, l'excès d'O₂ peut donc être utilisé pour le traitement physico-chimique oxydatif permettant de produire du CO₂ à partir de la biomasse non comestible, utilisable pour la croissance des plantes.

Toutefois, il est difficile d'offrir une diète équilibrée avec un nombre limité d'espèces végétales, si celles-ci présentent des manques en acides gras essentiels, et au vu du relativement faible contenu protéique. Raison pour laquelle les cultures possibles dans le compartiment IVb puisent dans un total de plus d'une vingtaine d'espèces cultivables, qui incluent la tomate, la pomme de terre, les oignons, la laitue, les épinards, du soja, mais aussi les céréales comme le riz ou le blé, etc.

Enfin, les plantes apportent un confort psychologique non négligeable pour les membres de l'équipage, puisqu'il reproduit un environnement de type terrestre – plus naturel que les bioréacteurs.

Les applications industrielles de ce dernier compartiment concernent 1) le secteur pharmaceutique (recherche sur le cancer basée sur la spiruline), 2) la production agricole rapide et efficace et 3) l'alimentation et les compléments alimentaires (Lasseur 2013).

En résumé, comme le décrit parfaitement l'ESA, « [p]our donner une idée de la complexité du problème, il faut s'imaginer que même une description la plus simplifiée possible de l'écosystème MELiSSA et de ses 5 étapes fondamentales précédemment décrites correspond en réalité à une centaine d'opérations unitaires physico-chimiques ou biologiques, environ 150 flux de matière gaz, liquide, solide dans

lesquels évoluent une bonne trentaine de constituants ! »⁴⁹.

4.2.1.3 Les projets liés à MELiSSA

4.2.1.3.a Les expériences préliminaires en vol

En parallèle à la phase 1, plusieurs activités de R&D ont été conduites pour l'étude qualitative et quantitative de ces effets spatiaux (expérience préliminaire en vol, phase 2). Dans le contexte de MELiSSA, cette phase cruciale vise à quantifier les effets d'un environnement spatial sur les processus biologiques. En effet, comme évoqué en introduction, un voyage vers Mars suppose que le vaisseau spatial et la base planétaire soient dotés d'une structure protégeant les astronautes à la fois du rayonnement cosmique et des éruptions solaires. En outre, la navette pourrait comporter des systèmes capables de simuler une gravité suffisante pour éviter les effets secondaires de l'apesanteur sur les organismes, basé sur des architectures de mission comme celle de Mars Direct (Zubrin 1998). En raison de la très grande complexité intervenant dans la conception et la réalisation d'ECA afin d'assurer le maintien de la vie humaine dans l'espace, l'ESA a tout d'abord commencé par étudier des sous-systèmes plus simples, comme ARTEMISS/MASK, BIORAT, FEMME ou MESSAGE.

✧ Le projet ARTEMISS (« Microgravity Analysis of Spirulina Kinetics », anciennement MASK) étudie la production d'oxygène et la croissance de la spiruline, la cyanobactérie photosynthétique du compartiment IVa de MELiSSA dans des conditions terrestres et spatiales (Lasseur 2013).

✧ L'expérience BIORAT a cherché à démontrer la faisabilité d'un bouclage pour le cycle CO₂/O₂ (Demey et al. 2000). Il s'agissait d'étudier les échanges gazeux en O₂ et CO₂ entre un photobioréacteur contenant la spiruline et un compartiment consommateur composés de souris. Il s'agissait de valider le modèle prédictif d'une algue unicellulaire produisant de l'oxygène à partir du gaz carbonique issu de la respiration de souris.

✧ L'étude FEMME (« First Extraterrestrial Man Made Ecosystem ») a permis de tester la robustesse des modèles mathématiques liés au bouclage de processus biologiques en conditions spatiales, en présence d'une gravité réduite ou de radiation (Paille et al. 1999; Paille et al. 2000). Il s'agissait en particulier de quantifier leurs effets de telles conditions sur les cinétiques microbiennes d'écosystèmes simplifiés, composés d'un compartiment photosynthétique et d'un autre hétérotrophique, liés par des échanges gazeux.

✧ D'autres études comme MESSAGE (« Microbial Experiment in Space Station About Gene

⁴⁹ Voir le document « Les Écosystèmes Clos Artificiels » de l'Agence spatiale Européenne, disponible en ligne: <http://ecls.esa.int/ecls/attachments/MELiSSA-Phase5/education/ecosystemes.pdf> (Dernière consultation le 20.05.2012).

Expression») se sont intéressées aux dangers potentiels que représentent les micro-organismes pour l'équipage et la corrosion du matériel lors de missions spatiales de longue durée. En effet, l'évaluation du risque de contamination de la nourriture et de l'eau par des bactéries, des virus et autres mycoplasmes s'avère indispensable. Par le biais d'un système clos embarqué dans la station spatiale internationale, les réponses des micro-organismes aux conditions spatiales (microgravité, rayonnement, magnétisme, etc.) et terrestres ont été monitorées et comparées, en particulier les effets sur la physiologie (croissance, mobilité) et la génétique (stabilité génétique, expression de gènes et induction de protéines spécifiques au spatial).

✧ Sur la station spatiale internationale (ISS), le *Biolab* a permis de réaliser des expériences sur le vivant. Elles ont porté sur des micro-organismes, des cellules, des cultures de tissus, des plantes et des petits animaux invertébrés et avaient pour but d'étudier le rôle et l'influence de la gravité sur différentes formes du vivant, depuis la cellule jusqu'à la plante ou à l'insecte.

✧ Le Projet MIDASS (« Microbial Detection in Air System for Space »), conjoint entre l'ESA et bioMérieux, vis à développer un système de détection rapide (en moins de 3 heures) des pathogènes dans l'air⁵⁰. Il s'agit de pouvoir identifier et quantifier des souches bactériennes et des champignons de manière automatisée et en conditions propres, afin d'assurer la biosécurité microbienne des surfaces et de l'environnement immédiat des astronautes. Les marchés concernés par la technologie incluent les milieux hospitaliers et les industries pharmaceutiques sur la qualité de l'air et des surfaces de l'habitat sain).

4.2.1.3.b La méthodologie ALISSE

ALISSE (« Aurora Life Support System Evaluator ») est une méthodologie de l'ESA pour la comparaison et la caractérisation des (sous-)systèmes de MELiSSA. Basée sur des simulations mathématiques et informatiques, elle a permis d'évaluer de manière indépendante les différentes stratégies développées dans le cadre de MELiSSA, dans le but de les optimiser.

L'ESA a fait appel à une analyse multicritère pour évaluer tout type de « Life Support System », selon les aspects suivants : l'efficacité, le ratio masse/volume, l'énergie, la fiabilité, le risque et le temps de l'équipage (Brunet & Gerbi 2009). La modélisation mathématique des processus à évaluer doit permettre une interopérabilité entre variantes de LSS. Les compartiments individuels ou le système complet ont été simulés avec leur environnement et leurs contraintes propres, afin de vérifier que les

⁵⁰ Voir la présentation « Microbial Detection in Space: The Midass project », donnée de Michèle J. Storrs, de bioMérieux dans le cadre du Workshop on innovation and technology within space exploration organisé le 29.04.2010 par l'ESA et la Commission européenne :

http://ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/conferences_page/workshop_2_ec_esa_29_april_2010/storrs.pdf
(dernière consultation le 23.06.2015)

objectifs du recyclage ou de la production d'oxygène, d'eau, de nourriture étaient remplis (en termes d'efficacité par exemple). Le modèle mathématique permet la simulation d'un paramètre statique (taux de recyclage à un instant donné), mais aussi dynamique, afin de pouvoir évaluer les temps de réponse à la suite d'une perturbation du système. Il doit aussi être flexible et modulaire pour pouvoir facilement substituer un des sous-systèmes lorsque nécessaire, permettant ainsi au vu de la longueur du projet de traiter chacune des solutions proposées rapidement et facilement.

Les restrictions en termes de masses embarquées dans les missions spatiales sont extrêmes. Tout type de composant pourrait être évalué en fonction de sa masse. La « masse » en question n'inclue pas uniquement le poids des équipements et hardware en soi, mais prend en compte les masses des services et des systèmes de soutiens associés. Pour ce faire, le ratio masse/volume peut être utilisé.

La consommation des différentes sources d'énergie doit être minimisée. Les pics de consommations sont critiques et doivent être le plus proche possible de la consommation moyenne, afin d'éviter des surdimensionnements des unités de production d'énergie.

La fiabilité est cruciale pour un séjour de longue durée de 2 à 3 ans sans assistance terrestre. En plus de celles des différents composants élémentaires, la fiabilité du système dans son ensemble doit être optimale, afin de pouvoir remplir les objectifs de la mission avec un risque proche de zéro. La redondance est un exemple de procédure permettant d'améliorer la performance. Cette redondance peut consister à combiner des sous-systèmes offrant les mêmes fonctions ou services, mais de différentes natures. Par exemple, un bioréacteur et un réacteur chimique peuvent être utilisés en parallèle. Ils présentent des caractéristiques différentes et ont une chance quasiment nulle de tomber en panne en même temps. Toutefois, de telles stratégies augmentent significativement la masse et entraînent de lourdes contraintes en termes de design. Si les composants électroniques utilisés dans le spatial (satellites de télécommunications) présentent une fiabilité validée souvent après des années de production, ce n'est pas le cas des applications chimiques et biotechnologiques. Un renforcement des collaborations avec les industries terrestres concernées semble pertinent pour améliorer la fiabilité de ce type de composant. Les résultats de telles coopérations pourraient servir à l'amélioration de la performance environnementale de ces mêmes activités industrielles optimisées.

Ajoutons que différents risques peuvent être distingués (voire connectés), que ce soit pour l'équipage ou pour les équipements des ECA, à savoir :

- les risques physiologiques : touchant le système cardiovasculaire, respiratoire, nerveux, immunologique, etc. ;
- les risques pathologiques : infection, intoxication alimentaire, allergie, etc. ;
- les risques biologiques : champignons, bactérie, virus, protozoaires, spores, prions, etc. ;
- les risques chimiques : corrosion, fuite de produits et substances toxiques pour les organismes de l'ECA et pour l'équipage, suffocation, électrocution, risque de brûlures, etc. ;

- les risques physiques : pression, température, mécanique, explosion, cassure d'un composant, irradiation, champ magnétique, risque d'incendie, etc.

Enfin, le temps de l'équipage doit être utilisé en priorité pour accomplir la mission et non pour opérer l'ECA. Il est divisé en temps de travail effectif, à savoir le temps de mission, et le temps de maintenance des BLSS, et inclus également le temps consacré au sommeil, à l'alimentation, aux activités physiques et aux activités personnelles.

Le temps de travail effectif en orbite basse terrestre a été estimé à environ 66 heures par semaine pour chacun des membres de l'équipage. Le temps de maintenance des LSS est plus conséquent pour l'exploration planétaire habitée, de par la plus grande longueur des missions et par le manque d'assistance terrestre tout au long des missions. Il s'agit de libérer autant que possible du temps de travail pour des tâches spécifiques à la mission elle-même. Tout surplus de temps consacré à l'exploitation, à la maintenance, à la surveillance des ECA peut à terme présenter à un risque d'échec de la mission. Les processus doivent être optimisés et permettre la détection précoce de tout comportement anormal de la boucle. Les procédures de pronostics et de diagnostics doivent être fournies pour chaque sous-système.

De plus, le temps que l'équipage consacre à cette maintenance doit pouvoir être perçu psychologiquement comme positif, c'est-à-dire agréable à réaliser : ni trop complexes, ni trop ennuyeux, ergonomiques, etc.

À titre indicatif, 38% du temps de l'équipage de *BIOS-3* a été consacré à la maintenance des processus LSS, soit 15 heures de travail hebdomadaires par personne pour le compartiment des plantes supérieures et 20.5 heures pour les cultures d'algues (J. I. Gitelson et al. 2004).

4.2.1.3.c L'étude FOOD

L'étude FOOD (« Fungus On Orbit Demonstration ») a évalué l'intérêt de connecter à la boucle MELiSSA un nouveau compartiment composé de champignons. Des *Pleutorus* et autres *Lentimus* ont été cultivés sur un substrat contenant le flux sortant du compartiment liquéfacteur (I), afin d'améliorer la dégradation des fibres organiques grâce aux enzymes lignolytiques de ces champignons, afin d'évaluer le potentiel de ces organismes comestibles pour l'amélioration de la valeur nutritionnelle de la diète de l'équipage (Rivas et al. 2000).

4.2.1.3.d Le projet BELISSIMA

Dans le cadre du projet BELISSIMA, l'unité de recherche en microbiologie du Dr Natalie Leys, du SCK-CEN en Belgique a développé de nouvelles méthodes de détection d'instabilité métabolique et

génomique, de contaminant bactérien et de transfert horizontal de gène dans la boucle MELiSSA⁵¹. Le fonctionnement de la boucle MELiSSA dépend fortement de la stabilité et de l'axénicité de chacun de ses compartiments. La consommation de produits pharmaceutiques, et l'utilisation de produits pour les soins personnels induisent l'entrée dans la boucle de molécules et produits chimiques biologiquement actifs et doivent être mieux comprises. Le projet BELISSIMA s'est intéressé au devenir de ces composants et au potentiel de dégradation des xénobiotiques par la boucle MELiSSA, afin d'identifier et d'éviter les risques pour la santé des organismes de l'ECA. L'effet d'agent antibactérien comme le triclosan a notamment été étudié.

4.2.1.4 Le MELiSSA Pilot Plant, l'installation pilote pour l'intégration progressive des sous-systèmes MELiSSA, mais sans l'Homme

La phase 3 des projets ESA traite des aspects d'ingénierie spatiale et de démonstration au sol. Elle permet de tester et adapter les technologies développées en phase 1, tout en prenant en compte les contraintes « hardware » des systèmes de support-vie.

Dans le contexte de MELiSSA, la stratégie de l'ESA vise à démontrer au sol la faisabilité technologique de la fermeture complète de la boucle MELiSSA, avec dans un premier temps des animaux, pour des raisons de coûts et de sécurité.

Actuellement, le projet MELiSSA bénéficie d'une installation pilote de deuxième génération, le *MELiSSA Pilot Plant*^{52,53} (ou MPP), basée à l'Université autonome de Barcelone⁵⁴, au sein de l'UAB School of Engineering. Les premiers développements ont démarré dès 1995, mais le site a été pleinement opérationnel en 2009, date de son inauguration officielle⁵⁵.

Chronologiquement, le développement de MELiSSA s'est d'abord focalisé sur la compréhension des sous-systèmes pris indépendamment, en se penchant sur un de leur composant à la fois. Cette phase était une condition indispensable à la construction d'un système complet. Il s'agissait ensuite d'intégrer les différents sous-systèmes et solutions développés et de vérifier s'ils pouvaient se coupler et fonctionner ensemble de manière adéquate (Poughon et al. 2009). L'étape suivante a fait appel à une approche

⁵¹ Pour une description du projet, voir le site web du SCK : www.sckcen.be/en/Our-Research/Research-projects/ESA-projects/BELISSIMA

⁵² Site web du MELiSSA Pilot Plant : www.esa.int/SPECIALS/Melissa/SEMZLJ8RR1F_0.html

⁵³ Lire à sujet l'article d'Olivier Dessibourg paru dans Le Temps du 02.05.2015, *Melissa, voyage simulé vers Mars en mode «recyclage»* :

http://www.letemps.ch/Page/Uuid/5556615a-f01c-11e4-8a43-4ad205b10b56/Melissa_voyage_simulé_vers_Mars_en_mode_recyclage

⁵⁴ Site web de l'Universitat Autònoma de Barcelona : www.uab.es/english/

⁵⁵ Voir le communiqué de presse : www.uab.cat/servlet/Satellite/latest-news/news-detail/melissa-pilot-plant-inaugurated-1096476786473.html?noticiaid=1244097360312

globale de développement, de compréhension, de simulation et d'évaluation, afin d'éviter des efforts et des coûts inutiles pour l'optimisation de sous-systèmes non compatibles entre eux.

Au vu de sa complexité, le projet MELiSSA a été élaboré via une procédure séquentielle. Tout d'abord, chacun des compartiments a été étudié individuellement. La recherche a impliqué :

- la sélection et la caractérisation des souches ;
- l'influence des conditions opérationnelles sur la physiologie et le métabolisme des cellules ;
- des études cinétiques, le design du bioréacteur, des modélisations mathématiques ;
- le développement de contrôle et de stratégies opérationnelles pour chaque bioréacteur.

La boucle MELiSSA n'est pas une simple juxtaposition de compartiments. Le système dans son ensemble ne se comporte pas comme la somme de ses éléments. Les écosystèmes réagissent au comportement de leur sous-systèmes, leurs composants individuels. À l'échelle globale, des feedbacks peuvent mener des « surprises » problématiques, même si les compartiments se comportent individuellement de manière relativement satisfaisante.

Dans un tel contexte, le MPP a précisément permis la poursuite d'une intégration progressive des différents sous-systèmes (compartiments) pour les principales boucles (gaz, liquide, solide) et les éléments carbone, d'azote, d'oxygène, etc. (Figure 7). L'équipage du MPP est composé d'animaux (40 rats, soit l'équivalent aux besoins en oxygène d'un membre de l'équipage humain) qui servent de modèle pour un test et une validation intégrée et progressive de la boucle MELiSSA (Godia et al. 2004). Plusieurs processus de caractérisation des différents compartiments de MELiSSA, développés par les membres du consortium, ont ainsi d'ores et déjà été accomplis. Les modèles mathématiques ont été validés afin de permettre un développement à l'échelle pilote.



Figure 7: Le MELiSSA Pilot Plant (MPP).

Le MPP représente l'installation pilote de MELiSSA basée à l'Université autonome de Barcelone. Légendes: a. Sur la droite, une vue du photobioréacteurs contenant la spiruline (Compartment IVa); b./c. Vue interne et externe de l'habitat, l'équipage étant aujourd'hui composé de 40 rats (Compartment V); d./e. Vue de l'extérieur et de l'intérieur de la chambre de culture des plantes (Compartment IVb); f./g./h. Le MPP est doté d'une instrumentation de contrôle du système particulièrement conséquent, au vu des multiples paramètres à monitorer. Source: ESA.

Concrètement, ce laboratoire externe de l'ESA a en outre permis :

- l'évaluation de la performance des compartiments isolés ;
- le test des modèles mathématiques propres aux infrastructures du MPP (cinétiques de croissance, rendements, performance hydrodynamique des bioréacteurs, etc.) ;
- l'agrandissement des bioréacteurs à une échelle pilote et une exploitation sur des périodes prolongées ;
- l'interconnexion progressive de l'ensemble des compartiments (sous-systèmes), incluant également :
 - le développement et l'intégration des interfaces entre les compartiments ;
 - les caractérisations additionnelles des compartiments (lorsque nécessaire) ;
 - l'intégration progressive des technologies complémentaires, à l'image de celles pour le traitement des fibres ;
- le test et l'intégration des systèmes de contrôle associés, incluant :
 - le développement des senseurs associés ;
 - les protocoles d'échantillonnage ;
 - le contrôle qualité des procédures ;
 - la mise en place d'un système de management de la qualité (certification ISO 9001).

L'objectif final du MPP est la démonstration l'évaluation et l'amélioration de la faisabilité de la boucle MELISSA dans des conditions au sol, afin de guider les développements futurs vers un système de support-vie biologique intégré pour des applications spatiales.

L'itération des données a été mise en place. Les résultats obtenus au MPP sont retournés aux partenaires MELISSA. Cette procédure assure l'amélioration continue du concept et la sélection des meilleurs scénarios émergeant des réflexions et des efforts combinés des membres du consortium.

Enfin, soulignons qu'il est prévu que la fermeture complète de la boucle MELISSA et des technologies de support-vie associées *avec un équipage humain* s'effectue au sein du futur simulateur au sol de l'ESA, nommé FIPES (Facility for Planetary Exploration Simulation, voir §4.2.2).

4.2.1.5 Le transfert de technologie : ramener l'innovation spatiale sur Terre

En parallèle à ces activités de démonstration au sol, le programme de transfert de technologie de MELISSA (phase 4) a permis le développement de solutions innovantes. Parmi elles, le monitoring et le contrôle la contamination biologique de l'ATV (« Automated Transfer Vehicle »), tout comme le suivi de la qualité microbienne de l'environnement (air, surfaces) et de l'eau pour l'ISS (MIDASS, §4.2.1.3.a). Actuellement, les technologies principales et leurs applications peuvent être classées en:

- technologies de recyclage des eaux (eaux grises, jaunes et noires) ;
- technologies de dégradation des déchets et des fibres ;
- technologies de régénération de l'air ;
- technologie de senseurs biologiques.

Un nombre croissant d'applications commerciales sont issues de ces travaux continus de recherche et développement (R&D et R&Da) propres aux technologies ci-dessus et ont été transférées avec succès vers des applications terrestres.

De manière générale, la plupart des technologies MELISSA sont comprises dans le secteur des cleantechs (technologies propres, écotecnologies) et peuvent être appliquées :

✧ Dans le domaine de l'épuration des eaux et dans les unités de traitement d'urine :

1) *Biostyr*® est par exemple un support de nitrification/dénitrification pour la croissance de bactéries utilisée pour une épuration biologique des eaux usées. La technologie est issue de résultats des recherches faites au sein du compartiment III. Développée en collaboration avec Veolia, cette solution permet une nette amélioration du processus de nitrification. En Europe, plusieurs millions de mètres cubes d'eaux usées sont traités chaque jour avec des technologies d'épuration basée sur MELISSA, dans les stations d'épuration de villes comme Rome, Paris, Lyon et Saragosse.

2) Quant à elle, *Space2Tex* est une technologie de recyclage des eaux usées dans l'industrie du textile utilisant des bioréacteurs à membranes⁵⁶.

3) Les unités de traitement des eaux grises et noires utilisées notamment à la *Station Concordia* en Antarctique (donc un projet de phase 3) sont également un exemple de transfert de technologie réussi. Un bouclage partiel de MELISSA et d'autres technologies de support-vie avec des humains y ont d'ailleurs été testés (en particulier le système de recyclage des eaux noires), tout comme c'est le cas au site *BIOS-3* à Krasnoïarsk en Sibérie.

4) Dans l'aéronautique, un traitement en vol des eaux grises a été testé dans des avions comme l'Airbus A380.

✧ Dans le domaine agroalimentaire :

1) Le projet MELISSA a permis le développement d'une technologie de monitoring de la biomasse immobilisée utile à l'industrie du vin mousseux. Avec ce biosensing effectué par mesure directe à l'aide

⁵⁶ SPACE2TEX - Waste water recycling in textile finishing through the application and further development of membrane bio-reactors : www.euratex.org/content/space2tex-waste-water-recycling-textile-finishing-through-application-and-further-developmen

de capteurs de biomasse, il n'est plus nécessaire de prélever un échantillon pour compter le nombre de cellules et déduire la concentration cellulaire. Son intérêt réside dans sa capacité à quantifier de la biomasse soit immobilisée (compartiment nitrificateur), ou soit présentant des hauts niveaux de concentration (compartiment liquéfacteur), pour lesquels il est indispensable d'avoir des méthodologies de mesures directes. Ces biosenseurs mesurent les propriétés électriques plutôt que les propriétés optiques du vin en cours de fermentation pour en déduire la concentration de levures. Lors de missions Mars, de tels biosenseurs joueront un rôle crucial pour le contrôle des processus de recyclage de la nourriture et des autres consommables. D'un point de vue terrestre, il s'agit d'un exemple intéressant d'intégration de biotechnologie dans les processus de production à l'échelle industrielle. Grâce à ce transfert terrestre réussi, l'industrie du vin mousseux bénéficie d'un biosenseur améliorant le contrôle de la fermentation en quantifiant l'activité biologique des levures, à savoir leur transformation du raisin en alcool et en CO₂ lors de la production de vin blanc pétillant. Ils sont utilisés par exemple par la société Freixenet, un des leaders mondiaux du secteur, pour l'un de ses produits phares, le Cava.

2) Basé sur les compartiments I et II, ELIRA (Epuraton des Lisiers avec Recyclage et Alimentation) vise à optimiser le traitement du lisier en valorisant les déchets organiques associés, afin de réduire l'impact environnemental de l'élevage intensif.

Le transfert de technologie et les activités de valorisation terrestre de MELiSSA sont gérés par une spin-off, IPStar BV⁵⁷, créée en 2007. La société commercialise les technologies de MELiSSA à des clients industriels, et se positionne dans les domaines de la durabilité (stratégies d'approvisionnement et d'assainissement en eau, gestion des déchets, revitalisation de l'air, efficacité énergétique) et de la santé (production de nourriture, contrôle qualité, sécurité alimentaire).

Une deuxième spin-off, EZcol, est une start-up souhaitant valoriser les propriétés anti-cholestérol d'un des micro-organismes de la boucle MELiSSA.

4.2.2 Le simulateur au sol FIPES : le futur démonstrateur technologique de l'ESA

4.2.2.1 *La préparation au sol des missions humaines d'exploration planétaire*

Ce chapitre se consacre à la préparation au sol des missions d'exploration planétaire, dans le cadre d'une campagne de simulation *intégrant un équipage humain*, et aborde les sujets suivants :

- l'étude HUMEX, une revue des réponses, des limites et des besoins de l'homme lors des

⁵⁷ Site web de IPStar BV : www.ipstar.nl/

missions humaines d'exploration planétaire (§4.2.2.1.a) ;

- l'étude REGLISSE, une revue des démonstrateurs au sol et des infrastructures pour la préparation de missions humaines d'exploration planétaire (§4.2.2.1.b) ;
- le projet *Mars500*, un simulateur d'habitat clos (§4.2.2.1.c) ;
- l'installation *envihab*, l'exploration des effets de conditions extrêmes sur l'homme (§4.2.2.1.d).

4.2.2.1.a L'étude HUMEX, une revue des réponses, des limites et des besoins de l'homme lors de missions interplanétaires

Même si le délai estimé a fréquemment varié ces dernières années, les programmes d'exploration spatiale américains ou européens prévoient généralement que les missions humaines vers Mars se produisent dans la première moitié de ce siècle.

Or, l'environnement et plus particulièrement les vols spatiaux microgravité, modifient plusieurs paramètres physiologiques sur le long terme. Ces changements, analogues au déconditionnement physiologique observé chez les personnes âgées, peuvent impacter fortement la santé humaine, et être dangereux (voire mortelles) dans certaines situations d'urgence ou lors d'activités particulièrement intenses physiquement, tels que des sorties extravéhiculaires sur une surface planétaire.

Entre 1999 et 2001, l'ESA a mené une vaste étude, dénommée HUMEX (pour « human exploration »), qui s'est penché sur les réponses, les limites et les besoins de l'homme lors de missions d'exploration habitées de longues durées (« survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions »), c'est-à-dire sur capacités d'adaptation et de survie de l'équipage à des conditions extrêmes, lui étant soumises de manière prolongée. L'étude a particulièrement analysé la recherche nécessaire pour les aspects liés 1) aux sciences de la vie, 2) à la médecine, 3) à la psychologie et 4) aux systèmes de support-vie.

HUMEX a permis l'identification des principaux éléments critiques de ce type de mission, sur la base d'une évaluation critique des facteurs limitants pour la santé et la performance humaine et des exigences nécessaires au maintien de la vie avec les contraintes en présence (Horneck et al. 2002; Horneck et al. 2006), à savoir :

- les risques du rayonnement pour la santé, principalement au cours des phases de transfert interplanétaire, ceux-ci étant significativement augmentés en cas d'éruption solaire ;
- les risques pour la santé causés par de longues périodes en microgravité, comme le risque de fracture osseuse suite à une conséquence de la déminéralisation osseuse;
- les risques psychologiques causés par l'isolation et le confinement à long terme dans un environnement jusqu'ici jamais ressentis par des humains ;
- la nécessité de l'emploi de systèmes de support-vie biorégénératifs dans l'habitat spatial –

complémentaire à la fois aux systèmes physico-chimiques et à l'utilisation de ressources in situ –, afin d'atteindre le plus haut degré possible de bouclage des flux de matières.

Compte tenu de ces contraintes élevées, il a été conclu que d'importantes activités de recherche et développement étaient nécessaires afin de fournir les informations de base sur une gestion intégrée (et appropriée) des risques, incluant des contre-mesures efficaces et un « support-vie » sur mesure. Les approches méthodologiques ont été élaborées en tirant parti des recherches sur l'ISS, des précédentes missions robotisées vers Mars, des installations existantes de simulation au sol (sans ECA), ainsi que des environnements naturels analogues sur Terre.

4.2.2.1.b L'étude REGLISSE, une revue des démonstrateurs au sol et des infrastructures pour la préparation de missions humaines interplanétaires

Jusqu'à la fin des années nonante, les pays européens ont développé leurs installations nationales pour étudier des aspects *spécifiques* des environnements extrêmes, tels que l'influence sur l'homme de la soumission 1) au rayonnement spatial, 2) à des périodes prolongées d'immobilisation en « bed-rest » 3), à des séjours prolongés en sous-marins ou en Antarctique, etc. Malheureusement, les besoins de futures explorations spatiales n'a pas été suffisamment pris en compte.

Certes, la Station spatiale internationale était considérée – et l'est toujours – comme un banc d'essai pour nombre de ces questions, et des installations terrestres étaient déjà opérationnelles pour certains des partenaires internationaux de l'ESA (*Bioplex* aux États-Unis ou *CEEF* au Japon), mais aucune synergie globale ou collaboration entre les centres qui étudiaient ces thématiques ne semblait exister à ce moment-là.

Dans la foulée d'HUMEX, l'étude REGLISSE (« Review of European ground Laboratories and Infrastructures for Sciences and Support Exploration ») a passé en revue les démonstrateurs au sol et les infrastructures à disposition de l'ESA pour la préparation des missions humaines d'exploration planétaire nécessitant des systèmes de support-vie. Entre 2001 et 2002, REGLISSE a par exemple permis de mieux définir quelles seraient les futures infrastructures européennes nécessaires pour une recherche scientifique approfondie sur des aspects de systèmes de support-vie, de psychologie, de médecine et d'exobiologie liés à ce type de vols spatiaux habités (Comet et al. 2000). De nombreuses infrastructures de pointe ont été identifiées pour ces différents champs de recherche. Cependant, l'accomplissement d'une recherche sur chacun de ces thèmes dans des lieux indépendants ne pourrait pas répondre à toutes les questions posées par l'exploration humaine, au vu de l'interconnexion de ces divers sujets et aspects.

À titre d'illustration, les principales connaissances sur les expériences d'isolement et de confinement

sur de longues durées proviennent actuellement des voyages spatiaux précédents (type ISS) et d'environnements analogues terrestres comme les sous-marins, les plateformes pétrolières, les expéditions à la *Station Concordia* en Antarctique, etc. Ces acquis sont toutefois insuffisants, notamment parce qu'ils ne portent que partiellement sur l'approvisionnement de l'équipage en nutriments.

Ainsi, le besoin d'un démonstrateur *intégré* au sol a été identifié. Le cahier des charges et les activités de FIPES, le simulateur d'ECA que l'ESA prévoit de construire à terme pour préparer les missions d'exploration habitées, sera décrit au §4.2.2.2.b.

Depuis HUMEX et REGLISSE, relevons que des campagnes simulations comme *Mars500* en Russie ont été effectuées, ou sont en développement, à l'image de l'installation : *envihab*, en Allemagne. Tous deux sont brièvement décrits ci-après, respectivement aux §4.2.2.1.c et §4.2.2.1.d.

4.2.2.1.c Le projet Mars500, un simulateur d'habitat clos

Le projet *Mars500*, conjoint entre l'Institut russe des problèmes biomédicaux (IBMP)⁵⁸ de l'Académie des sciences de Russie et l'ESA, a mené jusqu'en 2011 plusieurs campagnes de simulation d'une mission habitée vers Mars avec un pool de six membres d'équipage.

Le simulateur d'habitat clos en question était doté de trois modules simulant le vaisseau spatial ou la base planétaire :

- un module principal de vie (chambres, cuisine, salle de contrôle, toilettes, etc.), de 150 m³ ;
- un module médical (examens médicaux, télé-médecine, zone de quarantaine), de 100 m³ ;
- un module de stockage (réfrigération de la nourriture, serres expérimentales, salles de sport, salle de toilette).

Tous trois étaient interconnectés, fermés hermétiquement et reliés par des sas, et totalisaient un volume de 500 m³ et une surface de 200 m². À noter qu'un sous-ensemble de cette installation regroupait également un module d'atterrissage (50 m³) et un autre qui simulait la surface martienne (1'200 m³).

Concrètement, les membres de l'équipage ont fait l'objet d'un suivi quotidien poussé de nombreux paramètres psychologiques (aspects psychosociaux, comportement en groupe, régulation du stress), médicaux (physiologie des systèmes cardiovasculaires, immunologiques et neurologiques, études sur le

⁵⁸ Site web de l'IBMP : <http://mars500.imbp.ru/en/about.html>

sommeil et sur l'alimentation)⁵⁹.

Lors de la dernière campagne, un équipage a évolué durant plus de 500 jours entre la mi-2010 et la fin 2011 dans des conditions proches de celles envisagées pour une telle mission, à l'exception des contraintes d'apesanteur et de radiation. En outre, soulignons également que *Mars500* n'a pas bénéficié d'un approvisionnement basé sur la régénération des déchets de l'équipage par un système de support-vie biologique de type MELiSSA.

4.2.2.1.d L'installation :envihab, l'exploration des effets de conditions extrêmes sur l'homme

Basé au German Aerospace Center à Cologne, « :envihab »^{60,61} (pour « environmental habitat ») est un laboratoire scientifique pratiquant une recherche interdisciplinaire sur les interactions d'humains avec l'environnement. Le projet a démarré en 2007 et s'intéresse en particulier à la prévention et à la réhabilitation des effets négatifs de la microgravité, en lien avec la problématique du vieillissement de la population, ou de patients ayant été alités pendant une période prolongée.

Les objectifs affichés de cette infrastructure de recherche allemande, dont la construction s'est achevée à la mi-2013, couvrent en partie ceux de FIPES (§4.2.2.2.a), en particulier en ce qui concerne l'étude des aspects médicaux des habitats spatiaux. L'installation se compose de modules⁶², avec notamment 1) une salle équipée d'une centrifugeuse à bras court pour la simulation d'immobilisation et de microgravité, 2) une salle d'imagerie (tomographie par émission de positons, imagerie par résonance magnétique), ainsi que des laboratoires 3) une zone dédiée au suivi de la physiologie et du sommeil, 4) une salle de haute sécurité pour la microbiologie, et enfin 5) une partie réservée pour un accès au public visant à démontrer les retombées directes de la recherche spatiale et du développement technologique associé pour l'amélioration de la qualité de vie sur Terre. Un symposium sur le programme de recherche d':envihab s'est tenu à Cologne en mai 2011⁶³, qui a permis l'élaboration de recommandations (Koch & Gerzer 2011).

L'agenda de recherche de :envihab est orienté principalement sur le suivi de la santé d'un équipage évoluant dans des environnements et des conditions extrêmes – en incluant la prévention et la

⁵⁹ Voir les protocoles scientifiques des expériences sur le site de l'ESA :

www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Mars500/Scientific_protocols

⁶⁰ Site web de :envihab : www.dlr.de/envihab/en/desktopdefault.aspx

⁶¹ Brochure présentant :envihab :

www.dlr.de/envihab/en/Portaldata/72/Resources/dokumente/envihab_broschuere_27062013_prp.pdf

⁶² Description des modules (consulté le 28.02.2014) : www.dlr.de/envihab/en/desktopdefault.aspx/tabid-6904/

⁶³ Les présentations sont disponibles en ligne sur le site dédié à :envihab de l'agence spatiale allemande (DLR) : www.dlr.de/envihab/en/desktopdefault.aspx/tabid-6954/11496_read-26744/

réhabilitation (contre-mesures) des leurs effets négatifs sur l'homme. Les modules mettent l'accent sur les aspects psychologiques (performance de l'homme, travail d'équipe en conditions de stress) et médicaux (télémédecine pour le suivi et les soins à distance et la réhabilitation des équipiers) des habitats clos.

S'il se veut un catalyseur de recherche synergistique, il semble que son potentiel en la matière pourrait être mieux exploité. Il a certes le mérite de se vouloir vecteur de communication adéquate et adaptée avec le grand public. Toutefois, il n'incorpore pas d'ECA comparable à MELISSA, ce qui ne permet pas vraiment de préparer les missions humaines d'exploration dans des conditions suffisamment réalistes, puisqu'elles impliquent de faire appel à un système de support-vie (§4.2.2.1.a).

En résumé, *:envihab* se positionne plutôt comme un laboratoire pertinent et un analogue spatial intéressant pour effectuer des études « bed-rest » et mieux appréhender les effets physiologiques de certaines contraintes spatiales, mais il ne recouvre que partiellement l'agenda de recherche d'un simulateur d'ECA.

4.2.2.2 Le simulateur d'ECA : un banc d'essai indispensable pour faire face à des problématiques aussi bien spatiales que terrestres

Ce chapitre cherche à démontrer l'intérêt de déployer, au sein d'un simulateur d'ECA, un programme de recherche permettant de répondre à un double objectif, aussi bien dans une perspective spatiale que terrestre. Premièrement, car ce démonstrateur technologique peut être considéré comme un analogue capable de reproduire fidèlement certaines des contraintes spécifiques aux habitats spatiaux. En deuxième lieu, parce qu'un simulateur d'habitat clos semble être un laboratoire tout à fait pertinent pour son volet terrestre en soi, indépendamment de son intérêt spatial.

Le volet spatial propre au démonstrateur humain destiné à l'étude approfondie des ECA est abordé au §4.2.2.2.a, et l'utilité terrestre de ce dispositif expérimental étant exposée quant à elle au §4.2.2.2.b.

4.2.2.2.a FIPES, un analogue capable de reproduire fidèlement certaines des contraintes spécifiques aux habitats spatiaux

Pour rappel, les contraintes générales des habitats spatiaux traditionnels (ISS, missions lunaires) sont liées à des exigences extrêmes en termes de fiabilité, de logistique, de taille et de performance (voir §1.1.2). De plus, la conception et le développement d'habitats spatiaux pour des missions humaines vers Mars, impliquent non seulement le renforcement de ces contraintes, mais également que l'ajout de supplémentaires propres aux systèmes clos nécessaires aux missions de longues durées et des délais de télécommunication en raison des longues distances.

Par voie de conséquence, la complexité des missions humaines d'exploration planétaire est considérable et il devient indispensable de simuler au sol le plus fidèlement possible les contraintes spécifiques à ces habitats spatiaux en développement. C'est pourquoi un nombre suffisant de campagnes de simulation au sol devront être menées, au sein d'une installation *ad hoc*, afin de maximiser la faisabilité et la réussite de ces missions interplanétaires habitées.

Or, il ressort de la lecture des chapitres précédents que :

- pouvoir affronter les conditions extrêmes d'une mission habitée vers Mars exige de disposer d'un système de support-vie (voir le §4.2.2.1.a sur l'étude HUMEX) ;
- aucun démonstrateur terrestre intégrant un ECA – et incluant l'homme – n'existe actuellement (voir le §4.2.2.1.b sur l'étude REGLISSE). De plus, les initiatives comme Mars500 (§4.2.2.1.c) et :envihab (§4.2.2.1.d) traitent respectivement de la simulation d'habitat clos ou de celles des conditions extrême des habitats spatiaux. Toutefois, malgré la pertinence intrinsèque de leurs protocoles scientifiques, ni l'une ni l'autre des installations n'intègrent de système de support-vie biologique ;
- des projets d'ECA tels que MELiSSA ont précisément pour objectif de développer un système de recyclage bioinspiré capable de produire de la nourriture à partir des déchets organiques (voir §1.1.3 sur la bioinspiration et le §4 sur les BLSS) ;

Autant de raison qui justifie donc qu'à terme, l'ESA prévoit de construire un démonstrateur technologique au sol dénommé FIPES (« Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation) (Mas 2007). Au sein de cette « infrastructure pour la simulation intégrée de l'exploration planétaire », il est prévu de tester et de démontrer la faisabilité d'une fermeture aussi complète que possible de la boucle MELiSSA, au sein d'un habitat clos *intégrant l'homme* (Figure 8).



Figure 8: Vues d'artistes de FIPES (Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation).

Source: étude de définition effectuée par LIQUIFER Systems Group sur mandat de l'ESA en 2006⁶⁴.

Les infrastructures de ce futur simulateur d'ECA devront être dotées des équipements et installations nécessaires à la tenue de campagne de simulation de missions spatiales habitées, et ainsi permettre le développement, le test et la validation des technologies associées aux habitats spatiaux, dans les conditions les plus réalistes possibles (Figure 9, points 1 et 2), afin d'assurer la survie de l'homme dans des environnements planétaires et interplanétaires. Autrement dit, son but ultime n'est rien d'autre que de permettre à l'homme de fouler un jour le sol martien, tout en garantissant que l'équipage puisse revenir dans un état de santé voisin de celui qu'ils avaient au départ, en dépit des lourdes contraintes décrites précédemment. Nous examinerons en fin de section, les possibilités offertes par un simulateur d'habitat clos pour effectuer des recherches purement terrestres (Figure 9, point 3).

Au sein de ce véritable modèle « haute-fidélité », les activités de préparation permettront l'entraînement de l'équipage, ainsi que l'expérimentation et l'optimisation de protocoles scientifiques. Ces étapes préliminaires devront prendre en compte l'ensemble des aspects physiologiques, médicaux et psychologiques, mais également technologiques (microtechnologies, cleantechs, technologies de l'information et de la communication, etc.) propres aux conditions extrêmes auxquelles opèrent les BLSS.

La construction de ce démonstrateur humain permettra dès lors de poursuivre les développements de technologies de support-vie de l'ESA, en particulier ceux impliqués dans l'adaptation et l'optimisation des procédures opérationnelles se déroulant actuellement dans le MELiSSA Pilot Plant (§4.2.1.4). Ces activités seront utiles au développement et au déploiement de systèmes de support-vie avancés dans des environnements rigoureux. Ainsi, ce simulateur d'habitat clos devra permettre de créer et d'appliquer

⁶⁴ Voir la description du projet sur le site de LIQUIFER Systems Group : www.liquifer.com/fipes (dernière consultation le 02.07.2020)

des conditions comparables et des environnements analogues aux habitats spatiaux (analogues spatiaux, analogues martiens, etc.).



Figure 9: Rôles de FIPES

FIPES représente la possible future installation au sol de l'ESA qui pourrait servir de plateforme technologique non seulement pour 1) tester la mission dans les conditions les plus réalistes (« analogue spatial ») et 2) valider et développer les technologies spatiales (« démonstrateur technologique »), mais également pour 3) effectuer des recherches purement terrestres en tant que « simulateur d'ECA » ou « simulateur d'habitat clos ». Source: ESA

L'enjeu consiste à concevoir puis réaliser un habitat autonome (énergie mise à part) hébergeant un groupe restreint d'humains, ainsi que des organismes (bactéries, micro-algues et plantes supérieures, chacune originaire d'écosystèmes naturels) évoluant au sein d'un ECA. Ce dernier doit être capable du recyclage le plus complet possible (quasi intégral) de l'air, de l'eau, de la nourriture, ainsi que des divers déchets produits par son fonctionnement. Le design et le développement de ce système de support-vie biologique doivent permettre l'intégration (voire la fusion) de diverses technologies nécessaires à son bon fonctionnement, c'est-à-dire à l'exploitation, à la surveillance et au maintien de la santé de ses organismes. Il est prévu qu'un équipage d'au minimum six personnes puissent vivre dans l'installation durant de longues périodes (de quelques semaines à plusieurs mois, voire années). Autrement dit, FIPES constituerait un banc d'essai pour tester et expérimenter l'influence de conditions écosystémiques drastiques sur l'homme et sur les autres organismes du BLSS sur des périodes particulièrement

prolongées, en temps réel et de manière hypercontrôlée.

Un simulateur d'ECA tel que FIPES pourrait réunir des activités encore distinctes aujourd'hui, par exemple la simulation d'isolation (station Concordia, mission sous-marine, travail dans les plateformes pétrolières off-shore, etc.) et l'étude de l'effet du confinement terrestre sur l'organisme (hors des contraintes spatiales). Ce laboratoire de recherche pourrait ainsi se positionner comme un analogue unique en son genre, sans équivalent en Europe voire à l'internationale, pour l'étude des ECA et la démonstration des défis technologiques de l'envoi de personnes vers Mars.

FIPES pourrait être bâti d'ici environ cinq à dix ans dans un des pays membres de l'ESA encore à définir. Il pourrait être un maillon essentiel du développement d'une mission spatiale qui permettra peut-être de fouler le sol de la planète rouge à l'horizon 2035-2050.

Relevons encore que par le passé, la NASA s'est également penchée sur le développement d'une telle installation (Henninger et al. 1996), sans que les projets se concrétisent.

Plus concrètement, l'habitat clos hébergeant un ECA, qu'il s'agisse d'un simulateur au sol, d'une navette ou encore d'une future base martienne, doit servir à l'équipage de précieux support à la réalisation d'activités diverses qui incluent :

- la réalisation d'expériences scientifiques et protocoles scientifiques (§4.2.3) ;
- le recyclage des déchets organiques (§7.4) ;
- la surveillance de la santé des membres de l'équipage et des organismes de l'ECA (§8.2) ;
- les soins médicaux de routine, en cas de maladie, d'accident, etc. (§8.2.7) ;
- la production, le stockage et la préparation de la nourriture (§8.3.1) ;
- la formation et le maintien des connaissances (§9.4) ;
- les activités de loisirs (individuelles ou en groupe) et les activités sportives, afin d'éviter que la monotonie s'installe, et de maintenir la motivation des membres de l'équipage, ces derniers vivant dans des conditions d'isolation et de confinement extrêmes (§9.4) ;
- la communication avec les centres d'assistance, les familles et les proches, le public (via des réseaux sociaux de type Twitter ou Facebook) (§9.4) ;
- les procédures opérationnelles (maintenance, etc.) indispensables à la réussite de la mission au niveau de l'ECA et de l'habitat (y compris le ménage des locaux) (§10.5) ;
- le nettoyage du corps, l'hygiène corporelle et celui de l'habitat (§10.5) ;
- éventuellement, la simulation de sorties spatiales (sortie extra-habitat), en lien avec des aspects liés à l'exobiologie, mais aussi de conditions de pandémies (§10.5).

Ces activités seront pour la plupart discutées selon les chapitres susmentionnés, qui renvoient vers les

différents volets de l'agenda de recherche qui pourrait prendre place au sein d'un simulateur d'ECA (voir le §4.2.3 et la Partie II sur le programme Oïkosmos).

De plus, FIPES aurait tout intérêt, en sa qualité d'habitat sous fortes contraintes (§6.1.4) et au vu de la durée significative des campagnes de simulation, à fournir un certain niveau de confort à ses hôtes, afin de ne pas nuire à l'accomplissement de leurs tâches opérationnelles (d'un point de vue professionnel) et de garantir un minimum d'épanouissement personnel de chacun des membres grâce à une habitabilité adéquate (ergonomie, conditions psychologiques, lutte contre la monotonie).

Signalons toutefois que l'intégration de l'homme dans la boucle MELiSSA au sein d'un habitat clos requiert au préalable 1) la démonstration de la fermeture de la boucle avec des animaux, 2) la clarification des exigences nutritionnelles issues des études médicales et physiologiques en bed-rest menées dans l'ISS, 3) la maîtrise des risques microbiens et chimiques et 4) l'acceptation des consommables et aliments par l'équipage.

En conclusion, FIPES se profile donc comme un simulateur d'ECA non seulement pertinent, mais indispensable à l'étude, au pilotage et à la surveillance d'habitats spatiaux fonctionnant en système clos dans un démonstrateur technologique dans lequel l'homme interagira avec d'autres organismes vivants en présence de conditions extrêmes.

4.2.2.2.b Le simulateur d'ECA, un laboratoire pertinent indépendamment du spatial

En complément de son objectif spatial clairement affiché, un second volet – terrestre cette fois-ci – aura pour objectifs d'une part de réaliser des activités de R&D purement terrestres, et d'autre part de favoriser la mise en place de synergies de recherche entre les acteurs (chercheurs, industriels, etc.) en provenance du spatial et du non spatial. Ces activités permettront au simulateur d'ECA d'offrir un certain retour sur investissement à court terme, avec les retombées terrestres de la recherche sur l'exploration spatiale, comme on le verra en détails dans la Partie III de ce rapport.

Il est possible de considérer que les conditions de vie offertes par les habitats terrestres du futur puissent devenir de plus en plus similaires à celles des habitats spatiaux en terme 1) de confinement, 2) d'isolement et d'autonomie, 3) de conditions environnementales auxquelles sont exposés les habitants, 4) de rationnement de ressources matérielles et énergétiques nécessaires à l'habitat, 5) d'approvisionnement en nutriments nécessaires à la (sur)vie des habitants et enfin 6) en raison de la hausse des exigences de conformité pour la législation environnementale et les normes techniques, et hausse des coûts de traitements (voir le §1.1.2 pour les contraintes propres aux habitats spatiaux et le §6.1.4 pour la similarité potentielle des habitats terrestres de demain). Pour toutes ces raisons, le simulateur d'ECA est envisagé dans la présente étude comme une illustration d'un habitat sous fortes

contraintes : l'habitat clos. Bien entendu, il n'est pas sous-entendu que cette tendance rapprochera un jour réellement les contraintes des habitats terrestres à l'ensemble de celles auxquelles sont soumis les habitats spatiaux. Par contre, il est réaliste d'anticiper qu'un nombre croissant d'habitats de demain seront soumis à une ou plusieurs d'entre elles, par exemple lors de catastrophes naturelles.

Un des objectifs de la présente étude est de démontrer qu'à bien des égards, la construction d'une infrastructure scientifique et technologique telle qu'un simulateur d'ECA semble pertinente uniquement pour son intérêt « terrestre ». Autrement dit, un démonstrateur technologique d'habitat clos présente un potentiel intrinsèque fort pour une R&D appliquée questionnant des problématiques purement terrestres, même indépendamment d'activités « spatiales » liées à sa mission première de préparation de vols habités d'exploration interplanétaire.

Dans cette perspective, la simulation d'habitat clos est utile pour tenter de résoudre des problématiques cruciales aussi bien dans l'espace que sur Terre. Ce laboratoire de recherche peut servir de catalyseur de l'innovation et moteur du développement technologique permettant de questionner des problèmes terrestres actuels touchant à des domaines aussi variés que l'écotoxicologie, le recyclage de matières et de déchets organiques, l'utilisation optimale des ressources, la biosécurité et la vie en milieu confiné.

Soulignons enfin que les synergies de recherches seront au cœur du programme scientifique et technologique Oïkosmos de l'ESA, présenté ci-après au §4.2.3 et qui fait l'objet de la Partie II. Retenons à ce stade qu'Oïkosmos englobe le volet terrestre du programme qui doit permettre d'identifier, d'encourager, et de maximiser toutes formes de synergies de recherches terrestres et spatiales sur les ECA.

Le développement d'un simulateur d'ECA devrait être considéré comme une condition *sine qua non* pour la préparation optimale d'une mission Mars dont il représente l'infrastructure terrestre clé. En outre, cette véritable « plateforme technologique » favoriserait un transfert continu de savoir et de technologie du spatial vers le terrestre, et inversement. comme nous le verrons dans la Partie III de la présente étude.

4.2.3 Le programme Oïkosmos : un agenda de recherche axé sur la convergence entre recherches spatiales et terrestres

4.2.3.1 *L'approche synergistique du programme de recherche*

Comme son nom l'indique, la présente étude vise à établir des « synergies de recherches terrestres et spatiales sur les écosystèmes clos artificiels » dans le cadre du programme nommé « Oïkosmos ». Ce chapitre souhaite tout d'abord définir cette notion de « synergie de recherche », et présenter l'approche « synergistique » associée, à laquelle l'étude a fait appel du début à la fin, et qui est au cœur du programme Oïkosmos.

Étymologiquement, le terme « synergie » vient du grec *sunergia*, qui signifie « coopération », et qui provient lui-même de *sun-* « avec, ensemble » et *ergon* « travail ». Ce concept peut donc se traduire littéralement par « travailler ensemble ». Selon Le Grand Robert de la langue française, une synergie est « une action coordonnée de plusieurs organes, association de plusieurs facteurs qui concourent à une action, à un effet unique ». Par analogie, dans le cadre des synergies de recherche qui font l'objet de cette étude, il s'agit en l'occurrence d'associer les recherches de scientifiques des domaines du spatial et avec d'autres travailleurs dans des disciplines terrestres (celles du « non spatial »), afin de les amener à collaborer de manière coordonnée vers un but commun. Cette collaboration peut prendre plusieurs formes, comme la mise en commun de connaissances et/ou de ressources matérielles, pour parvenir à un effet précis.

Ajoutons qu'en pharmacologie, une « synergie médicamenteuse » signifie que l'administration *simultanée* par exemple de deux antibiotiques peut amener des effets additifs plus forts que ne l'aurait été l'addition de l'effet individuel de chacune des deux substances administrées séparément (ou séquentiellement). Dans le contexte d'Oïkosmos, un des objectifs de l'établissement d'une synergie de recherche réussie pourrait ainsi consister à faire émerger des résultats de recherche nouveaux et originaux, par la combinaison et le couplage coordonné de recherches terrestres et spatiales.

Par analogie à une « synergie musculaire » – pour l'exécution d'un mouvement donné –, une synergie de recherche incite à la mise en commun des dynamiques respectives de parties prenantes issues des domaines du spatial et du non spatial, leur amenant une valeur ajoutée réciproque. On verra dans la Partie III qu'une recherche synergistique sur les ECA peut jouer un rôle de « moteur de l'innovation » dans le développement des technologies liées aux systèmes de support-vie.

Le programme Oïkosmos se profile donc comme un projet sur la convergence entre recherche spatiale et terrestre. Il s'intéresse au potentiel, à la pertinence et aux opportunités offertes par l'établissement de synergies de recherche qu'il serait possible d'établir dans le cadre de l'étude approfondie des ECA (§4.2.1) et de l'exploitation d'un simulateur au sol préparant les missions humaines vers Mars dans les conditions les plus réalistes possible (§4.2.2). Il s'agit en particulier d'identifier quels domaines, thématiques et sujets de recherches peuvent intéresser à la fois les recherches terrestres et spatiales. Si les bénéfices terrestres d'une recherche interdisciplinaire sur les BLSS spatiaux est reconnue de longue date (Mitchell et al. 1996), la particularité d'Oïkosmos est l'association intime de son programme de recherche avec son installation ad hoc dédiée aux expérimentations dans un habitat clos dans lequel évolue un équipage lors de campagnes de simulation de moyennes à longues durées. Grâce à son approche synergistique, systémique (§5.1.3.1), interdisciplinaire et intégrative (§5.1.3.4), collective et coopérative (§5.1.3.5), sa démarche systématique (§5.1.3.6) et sa stratégie opérationnelle (§5.1.3.7), le déploiement d'Oïkosmos permettrait notamment 1) de mettre en évidence les liens parfois intimes – voire même cachés – entre la recherche terrestre et de nombreux sujets et disciplines du « spatial » et 2) de démontrer la pertinence et le potentiel intrinsèque d'un simulateur d'ECA pour maximiser les

synergies de recherches, confirmant le potentiel du simulateur d'ECA comme exposé au §4.2.2.2.b.

4.2.3.2 *Des synergies du spatial vers le terrestre, et vice-versa*

Le mot-valise « Oïkosmos » a été choisi pour dénommer le projet en 2004, sur proposition du Prof. Suren Erkman, et résulte de la contraction de « oïkos » (la maison, la Terre), et « kosmos » (l'univers). Oïkosmos exprime de manière succincte la nature « duale » du projet : à la fois spatial et orienté vers le développement durable sur Terre (le §10.1 reviendra en détail sur l'onomastique d'Oïkosmos). Ce programme de recherche suggère ainsi que la mise en place des synergies peut jaillir initialement aussi bien du terrestre que du spatial, avant de devenir – par définition – bidirectionnelle dans ses échanges entre les deux communautés de chercheurs.

Dans cette perspective, la deuxième partie du rapport répertorie dans un agenda de recherche préliminaire des synergies de recherche présentant l'une *et/ou* l'autre des pertinences suivantes, allant du spatial vers le terrestre, et vice versa :

✧ *Pertinence de la mission pour la recherche terrestre*

Les besoins spécifiques liés à la présence l'homme dans l'espace pour assurer sa santé, son bien-être et la fiabilité de ses performances sont des éléments moteurs non seulement du développement de technologies spatiales, mais aussi de solutions qui améliorent la vie des « Terriens ». Le programme Oïkosmos vise à ce que ce transfert de savoir du spatial vers le terrestre (« spin-out ») encourage de nombreux développements technologiques aboutissant à la création d'applications terrestres utiles aux citoyens européens, pour prendre l'exemples des certaines des retombées sociétales attendues des activités d'une agence comme l'ESA.

Par exemple, les vols spatiaux induisent des changements sur l'organisme tels qu'une perte osseuse, une baisse de la fonction immunitaire, ou encore une altération des capacités de travail. L'élaboration de contre-mesures à ces effets est indispensable pour garantir le maintien de la santé et de la performance des équipiers et astronautes. Or, de tels symptômes sont provoqués sur Terre, par les processus naturels de vieillissement des organismes, certaines maladies ou conditions de travail. La recherche sur les contre-mesures « spatiales » présente un intérêt pour répondre à des problématiques terrestres de gestion de la santé humaine, et aider à mieux appréhender et prendre en charge certaines maladies.

Les missions d'exploration planétaire pourraient également avoir des retombées terrestres intéressantes dans le domaine de la « durabilité terrestre », des retombées complémentaires à celles dont nous bénéficions déjà au quotidien – et dont l'importance ne cesse de croître –, au travers de services de télécommunications, de navigation assistée par satellite ou de météorologie, etc. Concrètement, la recherche en système clos permet également d'envisager le développement d'applications intéressantes sur Terre tels que des systèmes de recyclage hautement efficaces des déchets organiques dans le

contexte actuel de raréfaction des ressources matérielles, ou de détection précoce de pollution avec la dissipation croissante de polluants dans les écosystèmes naturels (de thèmes discutés au §6).

Rappelons d'ailleurs que les activités de recherche déployées dans les programmes d'exploration de l'ESA ont aujourd'hui déjà des applications dans la vie de tous les jours des Européens, notamment dans les technologies de traitement des eaux usées (voir §4.2.1.5).

◇ *Pertinence des recherches terrestres pour la mission*

Le programme Oïkosmos vise à ce que ce transfert de savoir du terrestre vers le spatial (« spin-in ») permette le test, la consolidation et la validation de l'état de l'art de la recherche terrestre, et des technologies associées parmi les plus émergentes, dans le simulateur d'ECA.

Le design et la conception du simulateur pourraient faire appel aux meilleures écotecnologies terrestres disponibles pour maximiser la performance environnementale du bâtiment (§6.2.2), et aux meilleures technologies « omiques » pour monitorer la santé des systèmes de molécules en présence dans l'ECA (génomique, protéomique, métabolomique, nutrigénomique..., voir §6.3, §8.2 et §8.3.2).

Des études préliminaires sur le programme Oïkosmos ont conclu à la nécessité de définir un agenda de recherche *global* (Erkman & Chèvre 2006). La démarche doit permettre de répondre – à terme – aux besoins scientifiques spécifiques à une mission spatiale habitée de longue durée et aux enjeux de recherche fondamentale pour un « Advanced Life Support System » (ALSS) autonome, c'est-à-dire un système de support-vie en cycle quasi fermé.

Voyons à présent quelles sont précisément les activités qui ont permis, dans le cadre de cette étude, de formuler un agenda de recherche pour le programme Oïkosmos.

PARTIE II : LE PROGRAMME OÏKOSMOS : SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

Dans sa deuxième partie, la présente étude identifie, catalogue et détaille les synergies de recherches terrestres et spatiales qui pourraient prendre place au sein d'un simulateur d'ECA ou d'habitat clos.

La méthodologie qui a permis la formulation de cet agenda de recherche pour le programme scientifique et technologique Oïkosmos est présentée au §5.

Le §6 est consacré au contexte terrestre et explore certaines des tendances lourdes en Europe qui peuvent être associées de manière pertinente à la problématique des ECA et des habitats clos (§6.1). Il s'attarde ensuite sur trois champs disciplinaires en plein essor qui présentent un fort potentiel pour l'établissement de synergies terrestres et spatiales dans le cadre du programme Oïkosmos. Le premier est le champ d'étude et d'action de l'écologie industrielle (§6.2). Le second champ disciplinaire est celui de la biologie systémique (§6.3). Enfin, le troisième est le champ de recherche des technologies de l'information et de la communication (§6.4).

Les chapitres suivants (§7 à §10) constituent le cœur de l'agenda de recherche lié à Oïkosmos. Ils détaillent, articulent et investiguent les synergies de recherche liées aux domaines introduits aux §6.2, §6.3 et §6.4, à savoir :

✧ pour le champ disciplinaire de l'écologie industrielle (§7) :

- l'approfondissement des concepts, des stratégies, des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle (§7.2) ;
- le pilotage fin et l'optimisation des conditions écosystémiques (§7.3) ;
- le développement de systèmes de recyclage hautement efficaces (§7.4).

✧ pour le champ disciplinaire de la biologie systémique (§8) :

- la biosurveillance et le maintien de la santé des organismes : de la génomique à la métabolomique (§8.2) ;
- la nutrition : de la production de nourriture aux approches nutriginomique et microbiomique (§8.3).

✧ pour le champ disciplinaire des technologies de l'information et de la communication (§9) :

- les sciences computationnelles et les sciences informatiques (§9.2) ;
- les technologies embarquées (§9.3) ;
- la télésanté (§9.4).

✧ à la notion d'habitat clos et durable (§10), à la convergence des trois champs disciplinaires, en lien avec les concepts connexes :

- d'éco-habitat (§10.2) ;

- d'habitat autosuffisant (§10.3) ;
- d'habitat autonome (§10.4) ;
- d'habitat sain (§10.5) ;
- d'habitat intelligent (§10.6) ;
- les aspects éthiques de la vie en habitat clos (§11).

Dans sa conclusion intermédiaire, la Partie II résume les nombreuses applications terrestres qui pourraient jaillir des synergies de recherche abordées précédemment.

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales du rapport

5 Introduction méthodologique

✧ Activités réalisées

Ce chapitre énumère les activités réalisées afin de formuler un agenda de recherche terrestre synergistique pour le programme Oïkosmos, à savoir :

- l'identification de la portée préliminaire du rapport (§5.1) ;
- l'identification des domaines favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale (§5.2) ;
- la consolidation de la portée du rapport (§5.3) ;
- la formulation d'un agenda de recherche pour le programme Oïkosmos (§5.4).

✧ Structuration

L'agenda de recherche catalogue les domaines, les thématiques et les sujets de recherche pertinents pour l'étude des ECA et les articule autour de synergies de recherche terrestres et spatiales. Il est présenté et détaillé dans les chapitres suivants, dont la structuration inclut les éléments suivants :

- Approche consolidée (§5.1.3) ;
- Portée préliminaire : domaines de recherche pertinents (§5.1.4) ;
- Domaines pertinents favorisant les synergies de recherche avec les institutions suisses, principalement en Suisse occidentale (§5.2.1) ;
- Domaines clés favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale (§5.2.2) ;
- Portée consolidée : domaines de recherche clés, articulés autour des clusters de Suisse occidentale (§5.3.3) ;
- Contexte terrestre (§6) ;
- Agenda de recherche : catalogue de domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents, articulés autour des synergies de recherches (§7 à §10).

§5.1 IDENTIFICATION DE LA PORTÉE PRÉLIMINAIRE DU RAPPORT

§5.1.1 Revue de la littérature

§5.1.3 Consolidation de l'approche du rapport

§5.1.2 Prise de contact avec les consortium MELiSSA

§5.1.4 Elaboration de la portée préliminaire du rapport

§5.2 CATALOGAGE DES DOMAINES FAVORISANT LES SYNERGIES DE RECHERCHE EN SUISSE OCCIDENTALE

§5.2.1 Identification des domaines pertinents favorisant les synergies de recherche avec les institutions de recherche suisses, principalement en Suisse occidentale

UNIL

CHUV

EPFL

CSEM

Autres institutions en Suisse

Projets et initiatives multipartenaires

Plateformes technologiques

§5.2.2 Sélection des domaines de recherches clés pour l'établissement de synergies de recherche en Suisse occidentale

§5.3 CONSOLIDATION DE LA PORTÉE DU RAPPORT

§5.3.1 Exploration du contexte terrestre et identification des champs disciplinaires clés dans le cadre d'Oïkosmos

Évolution démographique

Évolution épidémiologique

Pression sur les ressources

Habitats clos

§5.3.2 Articulation des domaines de recherche clés autour des clusters de Suisse occidentale

§5.3.3 Élaboration de la portée consolidée du rapport

Écologie industrielle

Biologie systémique

Technologie de l'information et de la communication

Habitat clos et durable

§5.4 FORMULATION D'UN AGENDA DE RECHERCHE POUR LE PROGRAMME OÏKOSMOS

5.1 Identification de la portée préliminaire du rapport

La portée préliminaire du rapport a été identifiée via les sous-activités suivantes :

- la revue de la littérature sur la base de la portée initiale du rapport (§5.1.1) ;
- la prise de contact avec les membres du Consortium MELiSSA (§5.1.2) ;
- la consolidation de l'approche du rapport (§5.1.3) ;
- sur cette base, l'élaboration de la portée préliminaire du rapport (§5.1.4).



5.1.1 Revue de la littérature basée sur la portée initiale du rapport

Dans sa première phase, la présente étude a tout d'abord cherché à identifier sa *portée préliminaire*, à savoir les domaines pertinents favorisant les synergies de recherche dans le cadre du programme Oïkosmos.

Cette portée préliminaire s'est développée autour des domaines de la *portée initiale* du rapport (§3.3). La revue de la littérature et de l'état de l'art de la recherche liée à l'étude des ECA a permis l'identification et la lecture d'environ 470 publications (voir bibliographie), ainsi que de nombreux articles parus dans les rubriques scientifiques et technologiques de journaux et de magazines spécialisés (cité en note de bas de page), intégrées pour la plupart aux différents thématiques et sujets détaillés par la suite dans la partie II.

Signalons que des études de faisabilité de FIPES que les présents auteurs ont pu consulter sont restées axées sur son design conceptuel, et ont peu porté sur le détail de l'agenda de recherche qui pourrait être déployé au sein d'un tel simulateur d'ECA. Parmi les enseignements et les résultats tirés de ces études (voir notamment Mas 2007), il ressort que les types de recherches et d'essais qui pourraient (devraient) être conduit(e)s traitent :

- des aspects de support-vie (fonctionnement des cycles, vie en milieu isolé et confiné) ;
- des aspects médicaux (physiologie, télémédecine) ;
- du facteur humain (psychologie, habitabilité) ;
- des structures de support (aspects communicationnels et éducationnels, de sécurité et de gestion opérationnelle, etc.).

On relèvera qu'un recoupement avec la portée initiale du rapport (§3.3), à l'exception de la perspective de l'écologie industrielle et du développement durable qui est absente. Qui plus est, ce genre d'agenda de recherche n'intègre pas non plus explicitement l'approche synergistique, du moins pas jusqu'au point que souhaite le faire Oïkosmos.

5.1.2 Prise de contact avec les membres du Consortium MELiSSA

La prise de contact avec chacun des groupes de recherche issus des institutions académiques européennes membres du Consortium MELiSSA de l'ESA – et spécialisés dans l'étude des ECA – s'est déroulée de la fin 2008 à la mi 2009, essentiellement par le biais :

- de visites du site de l'ESTEC (§4.2.1.1) en Hollande, depuis lequel l'ESA pilote le projet MELiSSA (équipe du Dr. Christophe Lasseur) ;
- de séances téléphoniques ;

- d'entretiens effectués (en bilatéral) :
 - lors de visites des chercheurs concernés à l'UNIL ;
 - lors de conférences sur les ECA (ex : European Advanced Life Support Workshop, Barcelona, 2009) ;
 - lors de séminaires internes au consortium (ex : MELiSSA summer university, La Vuedes-Alpes, 2010).

Relevons par exemple que suite aux échanges avec la direction du projet MELiSSA, il est ressorti que ses trois domaines principaux sont les systèmes de support-vie (LSS), la médecine et la psychologie. MELiSSA étant lui-même un volet du projet de simulateur (FIPES), qui intègre d'autres problématiques comme la biosécurité.

La revue de la littérature, combinée à la récolte des informations issues des échanges avec les parties prenantes de MELiSSA a permis d'élargir la portée initiale en identifiant et explorant de nouveaux domaines pertinents, afin d'effectuer une première consolidation.

5.1.3 Consolidation de l'approche du rapport

L'approche « synergistique » du rapport – présentée au §4.2.3.1 – a ensuite été consolidée. Ce chapitre vise à décrire les approches, les démarches et les stratégies qui ont été identifiées, et auxquelles l'étude a eu recours, à savoir :

- une approche systémique (§5.1.3.1) ;
- une approche biomimétique (§5.1.3.2) ;
- une approche « cycle de vie » (§5.1.3.3) ;
- une démarche transdisciplinaire, interdisciplinaire et intégrative (§5.1.3.4) ;
- une stratégie collective et coopérative (§5.1.3.5) ;
- une démarche systématique, empirique et itérative (§5.1.3.6) ;
- une stratégie opérationnelle (§5.1.3.7).

5.1.3.1 *Une approche systémique*

Dans le contexte d'Oïkosmos, l'usage d'une approche « systémique », parfois également appelée approche « globale » ou encore approche « holistique » permet :

- d'intégrer la complexité d'un ECA dans son ensemble : sa structure, son fonctionnement, ses mécanismes, son environnement, son niveau d'organisation, etc. ;
- d'appréhender la dynamique et les boucles de rétroactions d'un ECA : les facteurs régulant son homéostasie (facteurs de stabilisation et de déséquilibre de l'ECA), les interactions entre ses

sous-systèmes ;

- d'étudier et de quantifier les effets d'une perturbation sur l'ensemble de systèmes de molécules (comme le génome, protéome, métabolome, etc.) présents dans un organisme à un instant donné ;

Il ne s'agit pas d'une opposition stricte entre approches réductionniste et holistique, mais simplement de l'application d'une approche systémique à un système réduit, l'ECA.

Signalons que cette approche est abordée notamment au §6.2.3 sur l'écologie industrielle, au §7.3.4 sur la régulation de l'homéostasie, ou encore au §8 qui est consacré à la biologie systémique.

5.1.3.2 Une approche biomimétique

Le « biomimétisme » consiste essentiellement à s'inspirer des principes de fonctionnement de la « Biosphère » et à transformer cette inspiration en innovation. Ceci sous-entend l'optimisation d'une application technique à même de résoudre des problèmes complexes. L'approche biomimétique cherche ainsi à étudier cette Biosphère en développant des solutions bioinspirées, ayant pour objectifs :

- d'exploiter ses mécanismes pour les appliquer dans différents domaines technologiques (*bionique*) ;
- de faciliter son étude scientifique en la reproduisant en laboratoire (*biophysique*) ;
- de s'inspirer de l'organisation des écosystèmes (et du fonctionnement des êtres vivants qui la composent) pour mieux y intégrer l'organisation et les technologies humaines (*biomimétisme* à l'anglo-saxonne ou « *biomimicry* »).

Le biomimétisme fait l'objet du §7.3.1.4.

5.1.3.3 Une approche « cycle de vie »

En tant que pièce maîtresse du cadre conceptuel de l'écologie industrielle (§6.2), l'approche « cycle de vie » vise réduire autant que possible les impacts des activités, produits et services de l'écosystème industriel, sur l'ensemble de leur cycle de vie⁶⁵, c'est-à-dire « du berceau à la tombe » (*cradle-to-grave*), voire du « berceau au berceau » (*cradle-to-cradle*). Cette approche est abordée au §7.2.5 sur le

⁶⁵ Selon la norme ISO 26'000 – lignes directrices relatives à la responsabilité sociétale, l'approche cycle de vie [vise principalement à réduire les impacts environnementaux des produits et services et à améliorer leurs performances socio-économiques pendant toute la durée de leur cycle de vie, depuis l'extraction de matières premières et la production d'énergie jusqu'à la mise au rebut ou à la récupération en fin de vie, en passant par la fabrication et l'utilisation.]

perfectionnement de l'évaluation des impacts par la méthodologie de l'analyse de cycle de vie.

Dans le domaine de la biologie systémique, il s'agit également de pouvoir appréhender le cycle de vie des molécules circulant au sein des ECA, des habitats spatiaux et des habitats clos en général, en allant de leur synthèse par ou hors des organismes à partir de molécules organiques ou inorganiques, jusqu'à leur dégradation biologique ou physico-chimique dans ou hors des organismes, en passant par leur effet sur l'expression des gènes d'un organisme donné, c'est-à-dire « de la mine au gène ».

5.1.3.4 Une démarche transdisciplinaire, interdisciplinaire et intégrative

Le programme Oïkosmos fait appel à de multiples domaines et disciplines jusqu'ici non directement concernés par le spatial (§4.2.3.1). Cela présuppose d'appliquer une démarche transdisciplinaire et interdisciplinaire. Cette dernière favorise l'exploration, l'identification et la sélection de thématiques et de sujets de recherche permettant de bâtir des ponts avec des sujets initialement liés de manière « indirecte » à l'étude des ECA et des habitats spatiaux.

Une telle méta-démarche peut être considérée comme intégrative. Dans le contexte scientifique, *méta-* signifie « au-delà de » et est employé pour désigner des concepts qui en « englobe » d'autres. Dans le cadre du programme Oïkosmos, la catégorisation et la cartographie des thématiques de recherche doivent également faciliter leurs interconnexions, afin de bâtir des ponts entre les différents domaines et les sujets qui en découlent, menant ultimement à l'établissement de recherches interdisciplinaires, qu'elles soient liées ou non au domaine spatial. C'est en particulier le cas pour les recherches à la convergence des nouvelles technologies de l'information et de la communication et du champ de l'écologie industrielle (voir §9.3 sur les technologies embarquées basées sur des microtechnologies vertes) ou de celui des sciences biomédicales (voir §9.4 sur la télésanté).

L'intérêt d'un simulateur d'ECA pour une recherche interdisciplinaire est discuté au §16 de la Partie III.

5.1.3.5 Une stratégie collective et coopérative

Sur la base de cette démarche intégrative qui le caractérise, le programme Oïkosmos implique que les intervenants de toutes les disciplines puissent, par principe, interagir fortement par le biais d'une stratégie collective et coopérative. Il s'agit donc de favoriser la participation et la collaboration de communautés de chercheurs issus des disciplines variées formulées dans l'agenda de recherche (§7 à §10). Or, il ressort du rapport que nombre d'entre eux ne perçoivent pas (encore), aujourd'hui, qu'ils pourraient être directement concernés par un tel projet. Un des enjeux consiste donc à les inciter à y participer et de leur démontrer la valeur ajoutée potentielle de l'intégration de leurs compétences, tant d'un point de vue spatial que terrestre, via des synergies de recherche comme celles décrites ci-après.

Soulignons que ces parties prenantes ne se limitent pas uniquement aux institutions de recherche académique, mais incluent l'ensemble des acteurs de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché (§20.2).

La Partie III revient sur les aspects de coopération entre institutions publiques et privées.

5.1.3.6 Une démarche systématique, empirique et itérative

Afin de tirer profit au maximum du potentiel des approches, démarches et stratégies décrites ci-dessus, il est intéressant de chercher à les combiner et les passer en revue de manière quasi systématique. On peut les considérer comme des critères utiles à l'évaluation de la pertinence aussi bien lors de l'identification de nouvelles synergies de recherche à établir, que lors de l'exploration de nouvelles opportunités de collaboration interinstitutionnelles à mettre en œuvre dans le cadre du programme Oikosmos.

Relevons que le volet systématique s'est combiné avec un processus empirique (découverte de nouvelles thématiques) et itératif (ajustement et consolidation des thématiques) au fur et à mesure des entretiens effectués (§5.2).

5.1.3.7 Une stratégie opérationnelle

Le programme Oikosmos peut (et devrait, compte tenu de l'ampleur des investissements) avoir d'importantes retombées pour des applications terrestres, en termes de transfert de savoir et de technologie, notamment dans les domaines de l'écologie industrielle, de la biologie systémique, des technologies de l'information et de la communication et des microtechnologies. Le déploiement d'une stratégie opérationnelle doit permettre d'industrialiser certaines des technologies et des solutions innovantes développées dans le cadre des recherches sur les ECA, comme c'est déjà le cas aujourd'hui pour les systèmes de traitement des eaux.

La Partie III reviendra en détail sur ces aspects de transfert de savoir et de technologie.

Enfin, ajoutons que de telles approches semblent compatibles avec celle de la *European Science Foundation* (European Science Foundation 2000), puisqu'elles incorporent notamment :

- *une stratégie qui répond à une demande des utilisateurs/de la science* : des problématiques comme la gestion durable des ressources ou la prévention de la dissémination de micropolluants rencontrent par exemple un intérêt grandissant au sein de différentes de communautés de parties prenantes en Europe (institutions académiques, mais aussi collectivités et politiques de gestion

- des eaux usées) ;
- *des objectifs bien définis qui représentent de réels besoins scientifiques* : l'optimisation du rendement des processus de recyclage et le développement de système de recyclage hautement efficient correspondent à de réels besoins scientifiques actuels ;
- *la maturité suffisante des champs d'études et une flexibilité suffisante pour intégrer efficacement des thématiques innovantes* : de par son approche systémique et de par sa portée très large, le projet Oïkosmos présente une souplesse favorisant l'intégration de méthodologies, solutions et applications innovantes ;
- *une capacité de fertilisation croisée (« cross-fertilization » en anglais)* permettant d'établir des interactions entre les autres disciplines de la recherche spatiale et non spatiale. C'est précisément cette caractéristique propre aux synergies de recherches terrestres et spatiales qui fait tout l'intérêt de la démarche du projet Oïkosmos.

Ensemble, ces approches, démarches et stratégies ont permis l'établissement de la portée préliminaire du rapport (§5.1.4) et la détermination de *synergies de recherche terrestre et spatiale* qui pourraient être mis en œuvre dans le cadre de l'agenda de recherche du programme Oïkosmos (Partie II). Elles ont également servi, dans une moindre mesure, à identifier les *opportunités de transfert de savoir et de technologie* décrites dans l'argumentaire en faveur d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale (Partie III).

5.1.4 Portée préliminaire du rapport : domaines de recherches pertinents

Les activités décrites aux §5.1.1 à §5.1.3 ont permis d'identifier les premières pistes de programmes et de synergies de recherches possibles, à savoir des domaines, spécialités, branches, thématiques et sujets de recherche :

- potentiellement pertinents pour l'étude des écosystèmes clos artificiels et des habitats spatiaux ;
- susceptibles d'intéresser des chercheurs issus de domaines et disciplines scientifiques et technologiques « terrestres » et/ou du spatial ;
- compatibles avec l'approche synergistique du programme Oïkosmos décrite au §4.2.3.1 et l'approche consolidée présente au §5.1.3.

Sur cette base, la portée préliminaire du rapport a été élaborée. Celle-ci comprend les domaines de recherche pertinents, à savoir les domaines scientifiques et technologiques suivants :

- Systèmes de support-vie : fonctionnement des cycles, bioregénération, bioaccumulation,

(éco)toxicologie, survie en mode autonome, ingénierie des systèmes, mathématiques appliquées, instrumentalisation et maintenances des équipements ;

- Science de la vie : médecine : effets de l'isolation et du confinement, résistance aux antibiotiques, physiologie humaine, télémédecine, rythmes circadiens, alimentation ; biologie : microbiologie, physiologie végétale, biologie végétale, biologie cellulaire et moléculaire ;
- Sciences humaines : psychologie : comportement en groupe, processus de coopération, coopération en milieu isolé et confiné ; gestion de données : exploration de données ; traitement de l'information ; sciences de l'éducation et de la communication.
- Maîtrise des risques biologiques et chimiques : détection et identification de contaminants, biosécurité en milieu confiné, traitement et contre-mesures.
- Écologie industrielle : analyse de cycle de vie, métabolisme des flux de matière et de l'énergie, gestion intégrée et utilisation optimale des ressources environnementales, systèmes de recyclages hautement efficaces, écotecnologies de valorisation de l'eau, de l'air et des déchets organiques, efficacité énergétique.

5.2 Catalogage des domaines favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale

Les domaines de recherche de la portée préliminaire élaborée au §5.1.4 a ensuite servi de base à l'identification des groupes de recherche de Suisse occidentale qu'il semblait pertinent de contacter dans le cadre de la présente étude. Ces chercheurs, essentiellement actifs dans le domaine non spatial et dont les compétences, spécialités et travaux portent sur des domaines connexes au programme Oïkosmos, faisaient principalement partie des pôles de recherche académiques de (R&D fondamentale et appliquée) de Suisse occidentale. Ils ont été sélectionnés parmi les institutions de recherches identifiées à la Partie IV (§20.2.1).

Concrètement, la prise de contact et l'organisation des entretiens avec une nonantaine de groupes de recherches académiques de Suisse occidentale se sont déroulées de début 2009 à la fin 2013 (voir Annexe XX)⁶⁶. Ces rencontres ont permis de présenter le projet et de discuter de l'intérêt de principe d'un chercheur « terrestre » à établir de synergies de recherche avec un programme de recherche tel qu'Oïkosmos, tout clarifiant les autres opportunités de collaboration potentielles liées à l'exploitation d'un simulateur au sol basé en Suisse occidentale. Les entretiens ont été effectués selon un ordre du jour généralement composé des points suivants :

- la présentation du programme de recherche Oïkosmos : ses objectifs, son approche, ses activités, les exemples de synergies de recherche potentielles, etc. (voir les diapositives de la présentation-type à l'Annexe XX) ;
- la récolte et l'analyse d'informations complémentaires non publiées auprès des parties prenantes rencontrées ;
- l'évaluation du potentiel des domaines, thématiques et sujets de recherche propres aux travaux menés par les groupes de recherche rencontrés, favorisant les synergies de recherche, dans le cadre du programme Oïkosmos ;
- l'évaluation de l'intérêt de l'établissement de telles synergies de recherche avec les activités des groupes de recherche contactés ;
- l'étude des opportunités de collaboration possibles, ainsi que de leurs modalités, dans le cadre du développement et de l'exploitation d'un simulateur au sol ;
- l'identification d'autres chercheurs et institutions de recherche présentant un potentiel et un intérêt éventuel pour établir des synergies de recherche et/ou collaborer au programme Oïkosmos ;
- *lorsque pertinent* : la visite des laboratoires des groupes de recherches rencontrés.

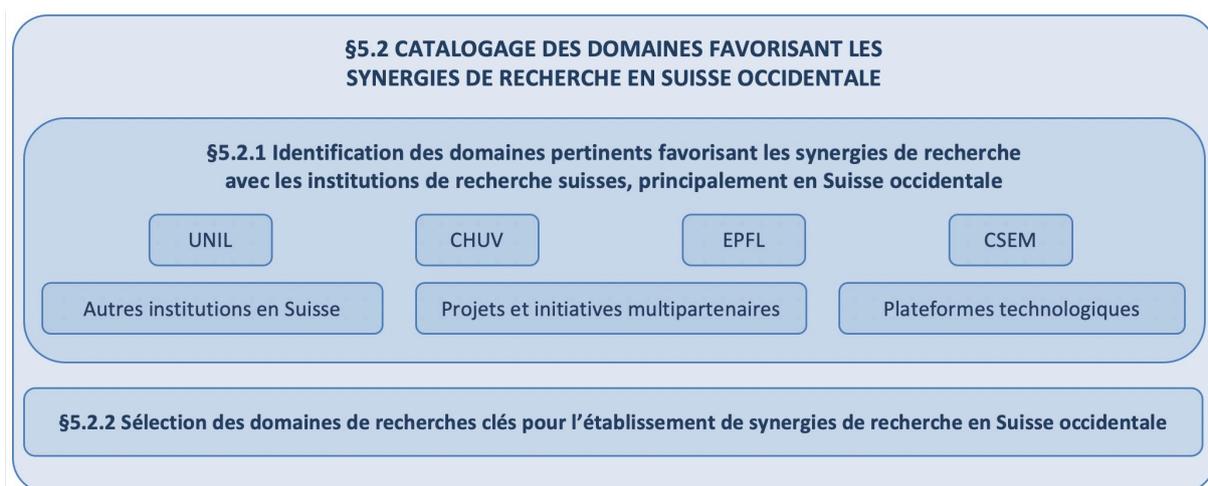
⁶⁶ La liste des plus de 80 groupes de recherches sur les 300 groupes de recherche identifiés qui ont fait l'objet d'un entretien est accessible dans le tableau récapitulatif qui a été élaboré en parallèle au présent rapport (colonne L).

Suite à ces entretiens, il a été possible d’identifier, sélectionner, cataloguer et compiler les domaines les plus pertinents pour l’établissement de premières pistes de synergies de recherche terrestre et spatiale avec les groupes de recherche d’institutions académique suisses, principalement celles basées en Suisse occidentale (§5.2.1), à savoir :

- l’Université de Lausanne (§5.2.1.1) ;
- le Centre hospitalier universitaire vaudois (§5.2.1.2) ;
- l’École Polytechnique Fédérale de Lausanne (§5.2.1.3) ;
- le Centre suisse d’électronique et de microtechnique (§5.2.1.4) ;
- les autres institutions de recherche suisses (§5.2.1.5) ;
- les projets et initiatives multipartenaires menés par des institutions de recherche suisses (§5.2.1.6) ;
- les plateformes technologiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie (§5.2.1.7).

Sur la base de ces interviews, un catalogue succinct des arguments en faveur, mais également opposés à de telles opportunités de collaborations (synergistiques ou non) a pu être établi. Celui-ci est présenté au §23.2 (Partie IV).

En outre, les contacts pris ont été permis de sélectionner les domaines clés de la portée consolidée (§5.2.2), puis d’ étoffer et de consolider l’agenda de recherche (§7 à §10), dans le cadre d’un processus itératif.



En complément, et en plus de détails, le tableau récapitulatif des « Parties prenantes de Suisse occidentale » (voir fichier Excel en annexe du rapport) :

- récapitule les groupes et unités de recherches associés aux départements et aux instituts des

facultés ci-dessus ;

- détaille pour chacun d’entre eux les mots clés associés à leurs activités de recherches (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) ;
- priorise les groupes et unités de recherche qui semblent les plus pertinents pour établir des synergies (priorité 1 à 3) ;
- propose un mode de participation au programme Oïkosmos (voir également §21), par exemple :
 - la participation au comité de pilotage ;
 - la participation au comité de projet ;
 - la participation au comité de consultation ;
 - la participation à un groupe de travail thématique.

5.2.1 Domaines pertinents favorisant les synergies de recherche avec les institutions suisses, principalement en Suisse occidentale

5.2.1.1 Université de Lausanne (UNIL)

Les domaines les plus pertinents favorisant les synergies de recherche terrestre et spatiale avec les groupes de recherche de l’Université de Lausanne sont cités ci-dessous. Un total de 60 groupes ont été identifiés au sein des quatre facultés suivantes :

- Faculté de biologie et de médecine (FBM)⁶⁷ : 37 groupes de recherche (§5.2.1.1.a) ;
- Faculté des géosciences et de l’environnement (FGSE)⁶⁸ : 8 groupes de recherche (§5.2.1.1.b) ;
- Faculté des sciences sociales et politiques (SSP)⁶⁹ : 7 groupes de recherche (§5.2.1.1.c) ;
- Faculté des hautes études commerciales (HEC)⁷⁰ : 8 groupes de recherche (§5.2.1.1.d).

Ceux avec un astérisque « * » ont fait l’objet d’un entretien, selon l’ordre du jour décrit au §5.1.2.

⁶⁷ Site web de la FBM : www.unil.ch/fbm

⁶⁸ Site web de la FGSE : www.unil.ch/gse

⁶⁹ Site web de SSP: www.unil.ch/ssp

⁷⁰ Site web de HEC : www.hec.unil.ch/hec/home

5.2.1.1.a Faculté de biologie et de médecine (FBM)

Les groupes de recherche identifiés au sein des Départements de la Section des sciences fondamentales de la Faculté de biologie et de médecine (FBM)⁷¹, sont listés ci-dessous⁷² :

◇ Département d'écologie et évolution (DEE) :

- Domaines : écologie, biologie évolutive, comportement, génétique des populations, bio-informatique, génomique.
- Groupes :
 - Groupe du Prof. Sanders - Microbiologie des mycorhizes* ;
 - Groupe du Prof. Keller - Génétique évolutive* ;
 - Groupe du Prof. Kaweki - Biologie évolutive de l'apprentissage et de la mémoire ;
 - Groupe du Prof. Lehmann - Coévolution des gènes.

◇ Département de microbiologie fondamentale (DMF) :

- Domaines : microbiologie environnementale, pathogénèse microbienne, génétique bactérienne, cycle cellulaire bactérien.
- Groupes :
 - Unité de recherche du Prof. Moreillon* - Pathogénèse microbienne ;
 - Unité de recherche du Prof. Collier - Régulation du cycle bactérien ;
 - Unité de recherche du Prof. Haas - ARN régulateurs ;
 - Unité de recherche du Prof. Van der Meer* - Microbiologie environnementale et de l'évolution.

◇ Département de biologie moléculaire végétale (DBMV) :

- Domaines : métabolisme des plantes, génétique du développement, morphogénèse, biologie cellulaire végétale.
- Groupes :
 - Groupe du Prof. Hardtke* - Bases moléculaires de la croissance et du développement des plantes ;
 - Groupe du Prof. Poirier - Métabolisme végétal ;
 - Groupe du Prof. Geldner - Biologie cellulaire végétale.

◇ Département de physiologie (DP) :

⁷¹ Site web de la FBM : www.unil.ch/fbm

⁷² Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oïkosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

- Domaines : métabolisme, neurosciences.
 - Groupes :
 - Groupe du Prof Zurich Fontanellaz - Effets délétères de facteurs de l'environnement sur le cerveau: détection et caractérisation ;
 - Groupe du Prof. Pellerin - Neuroénergétique: de l'alimentation à la cognition ;
 - Groupe du Prof. Tappy - Régulation du métabolisme par les nutriments ;
 - Groupe du Dr. Schneiter - Activité physique/nutriments et métabolisme humain.
- ◇ Département des neurosciences fondamentales (DNF) :
- Domaines : neurosciences, métabolisme, développement neuronal et plasticité, sommeil.
 - Groupes :
 - Groupe du Dr. Kasas - Toucher les molécules de la vie ;
 - Groupe du Prof. Luthi - Le rôle du sommeil dans les fonctions neuronales.
- ◇ Département de pharmacologie et de toxicologie (DPT) :
- Domaine : homéostasie des électrolytes et de l'eau
 - Groupe :
 - Groupe du Prof. Bonny - Homéostasie du calcium.
- ◇ Département de biochimie (IB) :
- Domaines : protéomique, immunologie.
 - Groupe :
 - Groupe du Prof. Martinon* - Voies de signalisation du réticulum endoplasmique.
- ◇ Centre intégratif de génomique (CIG)⁷³ :
- Domaines de recherches pertinents : sciences de la vie, recherche intégrée, interdisciplinarité, génomique, bioinformatique, structure et fonction du génome, évolution du génome, régulation de l'expression des gènes (par la machinerie de transcription, la structure de la chromatine, les facteurs de transcription et les voies de signalisation), génomique de fonctions complexes (physiologiques, comportementales, cognitives).
 - Groupes :
 - Groupe du Prof. Wahli* - Génomique des fonctions complexes ;
 - Groupe du Prof. Hernandez - ARN polymérase / cycle cellulaire ;
 - Groupe du Dr. Stasiak - Structure de l'ADN ;
 - Groupe du Prof. Tafti - Génétique du sommeil ;
 - Groupe du Prof. Thorens - Analyse moléculaire et physiologique de l'homéostasie

⁷³ Site web du CIG : www.unil.ch/cig/

énergétique ;

- Groupe du Prof. Reymond - Structure et expression du génome ;
- Groupe du Prof. Kaessmann - Évolution du génome ;
- Groupe du Prof. Gatfield - Horloge circadienne ;
- Groupe du Prof. Fankhauser - Photobiologie ;
- Groupe du Prof. Benton - Neurosciences et génétique ;
- Vital-IT / Groupe du Prof. Xenarios - Bioinformatique.

◇ Département de génétique médicale (DGM) :

- Domaines : bioinformatique, génétique, statistique, analyse de données biologiques en masse, sciences omiques.
- Groupes :
 - Groupe du Prof. Bergmann - Biologie computationnelle ;
 - Groupe du Dr. Kutalik - Génétique statistique.

◇ Institut de Biotechnologie (IB) :

- Domaines : génie génétique, biotechnologie moléculaire, bioinformatique :
- Laboratoire de Biotechnologie Moléculaire (LBTM) du Prof. Mermod.

◇ Institut suisse de bioinformatique (Swiss Institute of Bioinformatics, SIB)⁷⁴ :

- Le SIB est une fondation d'utilité publique composée de 31 groupes de recherche en provenance de toute la Suisse. Ensemble, ils fournissent des prestations de services et des ressources dans le domaine des bioinformatiques et bénéficient d'une excellente réputation parmi la communauté mondiale des sciences du vivant. Plusieurs d'entre eux sont basés à Lausanne, sur le site de Dorigny, l'UNIL étant le siège de l'administration centrale. Le SIB manage notamment Vital-IT⁷⁵, un centre de compétence et une plateforme de bioinformatique spécialisés dans les calculs à haute performance.
- Domaines : bioinformatique, sciences computationnelles, biologie des systèmes.
- Groupes UNIL :
 - Groupe du Prof. Bergmann - Biologie computationnelle (DGM-FBM) ;
 - Groupe du Dr. Kutalik - Génétique statistique (DGM-FBM) ;
 - Vital-IT / Groupe du Prof. Xenarios - Bioinformatique (CIG-FBM) ;
 - Groupe du Prof. Kaessmann - Évolution du génome (CIG-FBM).
- Groupes EPFL :
 - Laboratoire de biologie computationnelle et bioinformatique (LCBB) du Prof. Moret

⁷⁴ Site web du SIB : www.isb-sib.ch

⁷⁵ Site web de Vital-IT : www.vital-it.ch

(Faculté IC)

- Laboratoire de biotechnologie computationnelle des systèmes (LCSB) du Prof. Hatzimanikatis (Faculté SB, ISIC)
- Laboratoire de biostatistique et de théorie de l'évolution du Prof. Jensen (Faculté SV, IBI) ;
- Laboratoire de biologie computationnelle des systèmes du Prof. Naef (Faculté SV, IBI).
- Groupe UNIGE :
 - Groupe Informatique du protéome du Prof. Appel (Faculté des sciences).

De plus, 13 plateformes technologiques rattachées à l'UNIL et dédiées aux sciences de la vie (PTSV) ont été identifiées (voir la description de leurs services et activités au §5.2.1.7), à savoir :

- le Laboratoire de LC-MS/MS - Protein Analysis Facility (PAF) ;
- l'Electron Microscopy Facility (EMF) ;
- le Genomic Technologies Facility (GTF) ;
- le Protein and Peptide Chemistry Facility (PPCF) ;
- le quantitative Mass Spectrometry Facility (qMSF) ;
- le Cardiovascular Assessment Facility (CAF) ;
- le Protein Analysis Facility (PAF) ;
- le Cellular Imaging Facility (CIF) ;
- le Mouse Pathology Facility (MPF) ;
- le Mouse Metabolic Facility (MEF) ;
- le Transgenic Animal Facility (TAF) ;
- le Clinical epidemiology Center (CepiC) ;
- le Clinical Research Center (CRC).

On peut ainsi constater qu'avec les groupes de recherches identifiées et les plateformes technologiques dont elle dispose, la FBM est particulièrement bien équipée pour étudier la biologie systémique (§8.1). Ces orientations de recherches de la faculté intègrent donc pleinement les implications des approches issues du monde des sciences « -omiques », comme en témoigne le « FBM research day 2012, the world of omic »⁷⁶, qui a su mettre en valeur la diversité de la recherche biomédicale au sein de l'UNIL.

⁷⁶ www3.unil.ch/wpmu/fbmresearchday/programme (dernière consultation le 01.02.2013)

5.2.1.1.b Faculté des géosciences et de l'environnement (FGSE)

Les groupes de recherche identifiés à la Faculté des géosciences et de l'environnement (FGSE)⁷⁷, sont listés ci-dessous⁷⁸ :

◇ Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) :

- Groupe Écologie industrielle du Prof. Erkman* ;
- Groupe du Prof. M. Kanevski* - Analyse et modélisation spatiale de données environnementales.
- Unité du Dr. Chèvre* - Micropolluants ;
- Laboratoire de biogéosciences du Prof. Verrecchia* ;
- Groupe du Prof. Pena - Géochimie de l'environnement* ;
- Centre d'analyse minérale du Prof. Pfeifer*.

◇ Institut de géographie et durabilité (IGD) :

- Groupe Transition écologique du Prof. Bourg* ;
- Projet de recherche Clusterville coordonné à l'UNIL par le Dr. Kaiser*.

5.2.1.1.c Faculté des sciences sociales et politiques (FSSP)

Les groupes de recherche identifiés à la Faculté des sciences sociales et politiques (FSSP)⁷⁹, sont listés ci-dessous⁸⁰ :

◇ Institut de psychologie (IP) :

- Laboratoire de recherche expérimentale sur le comportement du Prof. Brandner.

◇ Institut des sciences du sport de l'Université de Lausanne (ISS) :

- Groupe de recherche de l'Institut des sciences du sport de l'Université de Lausanne (GRISSUL) :
 - Prof. Ohl (dopage, consommation) ;
 - Prof. Millet (physiologie de l'exercice).

◇ Institut des sciences sociales (ISS) :

- Laboratoire de psychologie sociale du Prof. Butera* ;

⁷⁷ Site web de la FGSE : www.unil.ch/gse/

⁷⁸ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

⁷⁹ Site web de SSP : www.unil.ch/ssp

⁸⁰ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

- Laboratoire des sciences de l'éducation du Prof. Fassa-Recrosio;
- Laboratoire de sociologie :
 - Prof. Kaufmann (communication, interdisciplinarité) ;
 - Prof. Panese (études sociales des sciences, médecine et société) ;
 - Prof. Vinck (études sociales de l'ingénierie et de l'innovation).

5.2.1.1.d Faculté des hautes études commerciales (HEC)

Les groupes de recherche identifiés à la Faculté des hautes études commerciales (HEC)⁸¹, sont listés ci-dessous⁸² :

◇ Département des systèmes d'information (ISI) :

- Domaines : métaraisonnement, systèmes d'aide à la décision, les systèmes intelligents et coopératifs d'information, formation flexible et à distance, mesures d'efficacité et de performance des systèmes d'information, intégration stratégique des télécommunications, cybermarketing, commerce électronique.
- Groupes :
 - Groupe du Prof. Wentland Forte - Nouvelles TIC pour l'éducation et la formation ;
 - Groupe du Prof. Legner - Management de l'architecture des systèmes informatiques de l'entreprise ;
 - Groupe du Prof. Ghernaouti Hélié - Cybersécurité.

◇ Département de comportement organisationnel (OB) :

- Domaines : comportement et décisions des individus et des groupes dans les entreprises, comportement organisationnel.
- Groupes :
 - Groupe du Prof. Dietz - RH et efficacité organisationnelle, gestion de la diversité ;
 - Groupe du Prof. Krings - Comportements contreproductifs ;
 - Groupe du Prof. Hoffrage - Jugements et prise de décision ;
 - Groupe du Prof. Antonakis - Leadership, différences interindividuelles.

◇ Département de stratégie (SGS) :

- Domaines : stratégie d'entreprise, innovation, diversification, éthique

⁸¹ Site web de HEC : <http://www.hec.unil.ch>

⁸² Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oïkosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

- Groupe :
 - Groupe du Prof. Castaner - Stratégie d'entreprise.

5.2.1.2 Centre hospitalier universitaire vaudois (CHUV)

Le Centre hospitalier universitaire vaudois à Lausanne (CHUV)⁸³ héberge les départements de la Section des sciences cliniques de la Faculté de biologie et de médecine (FBM) de l'UNIL et d'autres entités de recherches (services, centres, etc.)⁸⁴. Les groupes de recherche suivants ont été identifiés⁸⁵ :

◇ Département des laboratoires (DML) :

- Service de Biomédecine (BIO) du Prof. Mooser. Domaines : médecine personnalisée, médecine moléculaire et translationnelle, biomédecine, plateforme de médecine prédictive, intégration des marqueurs de la chimie clinique, de la génétique, de l'épidémiologie, de la pharmacologie clinique ;
- Institut de microbiologie (IMUL). Domaines : bactériologie clinique, maladies humaines, bactéries intracellulaires, résistance, séquençage de prochaine génération, analyse génomique, analyse de transcriptome :
 - Groupe du Prof. Greub - Bactériologie clinique ;
 - Groupe du Prof. McLaren - Bioinformatique hôte-pathogène.
- Institut de pathologie (IPA). Domaines : cytopathologie, biobanque :
 - Groupe du Prof. Stamenkovic - Pathologie expérimentale.

◇ Département de médecine (DM) :

- Service d'endocrinologie, diabétologie et métabolisme (EDM). Domaines: obésité, métabolisme, tractus gastro-intestinal, populations vulnérables, suivi à distance sur le contrôle du diabète, télémédecine.
 - Groupe du Prof. Pralong - Obésité et métabolisme ;
 - Groupe du Prof. Puder - Diabète.
- Service d'immunologie et d'allergie (SIA) du Prof. Pantaleo. Domaines : immunité antivirale, immunité des muqueuses, neuroimmunologie, vaccins.

◇ Département universitaire de médecine et santé communautaires (DUMSC). Domaines : médecine,

⁸³ Site web du CHUV : www.chuv.ch

⁸⁴ Liste des entités du CHUV : www.chuv.ch/chuv_home/le-chuv-en-bref/chuv-enbref-organigramme/chuv-patients-entites.htm

⁸⁵ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oïkosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

santé au travail, hygiène du travail, sciences de l'exposition :

- Institut universitaire romand de santé au travail (IST) (Prof. Danuser).

◇ Département de radiologie médicale (DRM). Domaine : imagerie biomédicale :

- Centre d'imagerie biomédicale (CIBM) du Prof. Gruetter.

◇ Département de l'appareil locomoteur (DAL). Domaines : maladie osseuse, ostéoporose :

- Centre des maladies osseuses (Prof. Krieg).

◇ Division de pharmacologie et toxicologie cliniques. Domaines : analyses et mesures pharmacocinétiques, suivi thérapeutique de l'administration de médicaments, effets indésirables :

- Projet Suivi thérapeutique de l'administration de médicaments (TDM) / Projet Nano-Tera: Intelligent Integrated Systems for Personalized Medicine (ISyPeM) du Prof. Buclin.

◇ Service de pédiatrie. Domaines : métabolomique, pédiatrie moléculaire, maladies génétiques des tissus conjonctifs, osseux et cartilagineux :

- Chaire d'excellence Leenaards en pédiatrie du Prof. Superti-Furga.

◇ Service de médecine préventive hospitalière. Domaines : hygiène hospitalière, épidémiologie, médecine du personnel :

- Unité cantonale Hygiène, Prévention et Contrôle de l'Infection (HPCI) (Dr Senn).

De plus, 6 plateformes technologiques du CHUV dédiées aux sciences de la vie (PTSV) ont été identifiées (pour une description de leurs services, voir §5.2.1.7), à savoir :

- le Cellular Imaging Facility (CIF) ;
- le Mouse Pathology Facility (MPF) ;
- le Mouse Metabolic Facility (MEF) ;
- le Transgenic Animal Facility (TAF) ;
- le Clinical epidemiology Center (CepiC) ;
- le Clinical Research Center (CRC).

5.2.1.3 *École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*

Les domaines les plus pertinents favorisant les synergies de recherche terrestre et spatiale avec les groupes de recherche (laboratoires de recherche) de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne

(EPFL)⁸⁶ sont cités ci-dessous. Un total de 105 laboratoires ont été identifiés au sein des instituts des 6 facultés suivantes :

- Faculté Environnement naturel, architectural et construit (ENAC)⁸⁷ : 24 laboratoires de recherche (§5.2.1.3.a) ;
- Faculté Sciences de la Vie (SV)⁸⁸ : 20 laboratoires de recherche (§5.2.1.3.b) ;
- Faculté Sciences et techniques de l'ingénieur (STI)⁸⁹ : 40 laboratoires de recherche (§5.2.1.3.c) ;
- Faculté Informatique et Communications (IC)⁹⁰ : 11 laboratoires de recherche (§5.2.1.3.d) ;
- Faculté Sciences de base (SB)⁹¹ : 9 laboratoires de recherche (§5.2.1.3.e) ;
- Collège du Management de la Technologie (CDM)⁹² : 1 chaire (§5.2.1.3.f).

Ceux avec une astérisque « * » ont fait l'objet d'un entretien, selon l'ordre du jour décrit ci-dessus.

5.2.1.3.a Faculté Environnement naturel, architectural et construit (ENAC)

Les laboratoires de recherche identifiés au sein de la Faculté Environnement naturel, architectural et construit (ENAC)⁹³ sont listés ci-dessous⁹⁴ :

✧ Institut d'ingénierie de l'environnement (IIE) :

- Domaines : sciences et ingénierie de l'environnement, interactions sol-atmosphère (pollution atmosphérique), interactions eau-sol (étude bio-physico-chimique des processus), écohydrologie (cycle de l'eau, relations eau-sol-plantes-atmosphère, changement climatique), qualité de l'eau (nouvelles méthodes de mesure, dépollution), pollution de l'environnement naturel et construit (transformation des polluants, techniques de remédiation, biodégradation, traitements naturels), traitement des déchets solides et liquides (développement de nouveaux procédés), gestion des ressources et des écosystèmes, fonctionnement des écosystèmes, développement d'outils et méthodes de mesure pour l'environnement (robots, réseaux de capteurs sans fil, radar optique, géomatique, SIG - système d'information géographique, etc.).

⁸⁶ Site web de l'EPFL : www.epfl.ch

⁸⁷ Site web de la Faculté ENAC : <http://enac.epfl.ch/>

⁸⁸ Site web de la Faculté SV : <http://sv.epfl.ch>

⁸⁹ Site web de la Faculté STI : <http://sti.epfl.ch>

⁹⁰ Site web de la Faculté IC : <http://ic.epfl.ch>

⁹¹ Site web de la Faculté SB : <http://sb.epfl.ch>

⁹² Site web du CDM : <http://cdm.epfl.ch>

⁹³ Site web de la Faculté ENAC : <http://enac.epfl.ch/>

⁹⁴ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

- Groupes de recherches :
 - Laboratoire de technologie écologique (ECOL) du Prof. Barry ;
 - Laboratoire de microbiologie environnementale (EML) du Prof. Bernier-Latmani* ;
 - Laboratoire des systèmes écologiques (ECOS) du Prof. Buttler* ;
 - Laboratoire environnemental central (GR-CEL) du Dr. De Alencastro ;
 - Groupe de recherche en bioénergie et planification énergétique (BPE) du Prof. Gnansounou ;
 - Laboratoire de biotechnologie environnementale (LBE) du Prof. Kaplan ;
 - Groupe de recherche sol-végétation-atmosphère (ARVE) du Prof. Kohn ;
 - Laboratoire de chimie environnementale (LCE) du Prof. Holliger* ;
 - Laboratoire de systèmes et algorithmes intelligents distribués (DISAL) du Prof. Martinoli ;
 - Laboratoire de physique des systèmes aquatiques, Chaire Margaretha Kamprad (APHYS) du Prof. Wüest ;
 - Laboratoire de géochimie biologique (LGB) du Prof. Meibom ;
 - Laboratoire de modélisation de la chimie environnementale (LMCE) du Prof. Arey ;
 - Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESO-PB) du Prof. Scartezzini* ;
 - Laboratoire de toxicologie de l'environnement (TOX) du Prof. Schirmer ;
 - Laboratoire de recherche sur les particules atmosphériques - (APRL) du Prof. Takahama ;
 - Laboratoire pour le traitement et la qualité de l'eau (LTQE) du Prof. Von Gunten ;
 - Unité de la Prof. Hering en chimie environnementale (EAWAG).

◇ Institut d'architecture et de la ville (IA) :

- Domaines : architecture durable et technologies du bâtiment ;
- Groupes :
 - Laboratoire interdisciplinaire de performance intégrée au projet (LIPID) du Prof. Andersen ;
 - Laboratoire d'architecture urbaine (LAURE) du Prof. Bassi.

◇ Institut d'ingénierie civile (IIC) :

- Domaines : étude du comportement des matériaux de construction (composites et traditionnels, béton, métal, bois), énergies renouvelables (solaire, biomasse), physique des bâtiments (technologies biomimétiques, qualité de l'environnement intérieur, éclairage naturel), environnement souterrain (géologie, sols, écoulements souterrains, roches, tunnels et autres ouvrages souterrains) ;
- Groupe :

- Laboratoire de la construction métallique (COM) du Prof. Nussbaumer*.

5.2.1.3.b Faculté Sciences de la Vie (SV)

Les domaines de recherche de la Faculté Sciences de la Vie (SV)⁹⁵ incluent : le cancer, le diabète, les maladies infectieuses, les désordres neurologiques, l'approche intégrée, la génomique fonctionnelle, la bio-ingénierie, les neurosciences computationnelles, la modélisation structurale, l'infectiologie, la santé globale, au carrefour entre biologie, sciences de base, informatique et ingénierie.

Les laboratoires de recherche identifiés au sein de la Faculté SV sont listés ci-dessous⁹⁶ :

◇ Institut des neurosciences (BMI) - Brain Mind et Blue Brain :

- Chaire Fondation Bertarelli de neuroprothétique cognitive (LNCO) du Prof. Blanke ;
- Laboratoire de génétique comportementale (LGC) du Prof. Sandi ;
- Laboratoire de neuroscience des microcircuits (LNMC) du Prof. Markram ;
- Laboratoire de traitement sensoriel (LSENS) du Prof. Petersen ;
- Laboratoire de psychophysique (LPSY) du Prof. Herzog.

◇ Institut interfacultaire de Bioingénierie (IBI) :

- Chaire Nestlé en métabolisme énergétique du Prof. Auwerx ;
- Laboratoire de modélisation biomoléculaire (LBM) du Prof. Dal Peraro ;
- Laboratoire de biologie et de génétique des systèmes (LSBG) du Prof. Deplancke ;
- Laboratoire du Prof. Jensen – Biostatistique et génétique des populations ;
- Laboratoire du Prof. Naef – Biologie des systèmes ;
- Laboratoire de mesure et d'analyse des mouvements (LMAM) du Prof. Aminian ;
- Laboratoire de bio- et nano-instrumentation (LBNI) du Prof. Fantner ;
- Chaire Fondation Defitech en interface non invasive de cerveau-machine (CNBI) du Prof. del R. Millán ;
- Laboratoire de biomécanique en orthopédie EPFL-CHUV-DAL (LBO) du Prof. Pioletti ;
- Laboratoire de traitement d'image médicale (MIP) du Prof. van De Ville ;
- Groupe de photonique médicale (GR-VDB) du Prof. van den Bergh ;
- Laboratoire de médecine régénérative et de pharmacobiologie (LMRP), Chaire Merck-Serono en technologies d'administration de médicaments du Prof. Hubbell.

⁹⁵ Site web de la Faculté SV : <http://sv.epfl.ch>

⁹⁶ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

◇ Institut Santé Globale - Infectiologie (GHI) :

- Laboratoire de microbiologie moléculaire (UPBLO) du Prof. Blokesch ;
- Laboratoire de virologie et génétique (LVG) du Prof. Trono* ;
- Laboratoire du Prof. Fellay – Génomique humaine des maladies virales ;
- Laboratoire de biologie des cellules et des membranes (VDG) du Prof. van der Goot ;
- Laboratoire de microbiologie et microsystèmes (UPKIN) du Prof. McKinney ;
- Laboratoire d'immunologie intestinale (UPHARRIS) du Prof. Harris ;
- Laboratoire du Prof. Lemaître (UPLM) – Mécanismes moléculaires d'infections microbiennes.

◇ Institut de recherche expérimentale sur le cancer (ISREC) :

- Unité du Prof. Lingner (UPLIN) - Télomères.

De plus, 8 plateformes technologiques de l'EPFL dédiées aux sciences de la vie (PTSV) ont été identifiées (voir la description de leurs services et activités au §5.2.1.7), à savoir :

- le BioEM Facility ;
- la BioImaging & Optics platform (PT-BIOP) ;
- le Bioinformatics and Biostatistics Core Facility (BBCF) ;
- le Proteomics Core Facility (PCF) ;
- le Histology Core Facility (HCF) ;
- le Biomolecular Screening Facility (BSF) ;
- le Flow Cytometry Core Facility (FCCF) ;
- le Protein Expression Core Facility (PECF).

5.2.1.3.c Faculté Sciences et techniques de l'ingénieur (STI)

Les domaines de recherche de la Faculté Sciences et techniques de l'ingénieur (STI)⁹⁷ sont: la mécanique, l'électricité, la microtechnique, les sciences des matériaux et la bio-ingénierie, en relation étroite avec les sciences de base ou sciences de la vie.

Les laboratoires de recherche identifiés au sein de la Faculté STI sont listés ci-dessous⁹⁸ :

◇ Institut interfacultaire de Bioingénierie (IBI) :

- Ingénierie biomédicale: intégration des sciences physiques, chimiques, mathématiques et

⁹⁷ Site web de la Faculté STI : <http://sti.epfl.ch>

⁹⁸ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oïkosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

computationnelles et des principes de l'ingénierie à l'étude de la biologie, de la médecine et de la santé; développements de matériaux, de processus biologiques, d'équipements, d'implants innovants.

- Domaines: morphogénèse, réparation, structure biologique, mécanique fonctionnelle, biotechnologie moléculaire et fonctionnelle, bioinformatique, biologie des systèmes.
- Groupes de recherche :
 - Laboratoire d'électronique pour les sciences du vivant (CLSE) du Prof. Guiducci ;
 - Laboratoire de caractérisation du réseau biologique (LBNC) du Prof. Maerkl ;
 - Chaire Julia Jacobi de photomédecine - Laboratoire de biophotonique fondamentale (LBP) du Prof. Roke ;
 - Laboratoire d'hémodynamique et de technologie cardiovasculaire (LHTC) du Prof. Stergiopulos ;
 - Laboratoire d'ingénierie neurale translationnelle (TNE) du Prof. Micera.

◇ Institut de génie électrique et électronique (IEL) :

- Domaines: circuits et équipements: design de software et de hardware, biosenseurs, nanoélectroniques; ingénierie informatique et communicationnelle: traitement de l'image, visualisation de l'information, traitement de signaux biomédicaux ;
- Groupes de recherche :
 - Laboratoire des systèmes embarqués (LES) du Prof. Alonso ;
 - Laboratoire des systèmes intégrés (LSI) du Prof. De Micheli* ;
 - Laboratoire des dispositifs nanoélectroniques (NANOLAB) du Prof. Ionescu ;
 - Laboratoire de l'IDIAP (LIDIAP) du Prof. Bourlard ;
 - Laboratoire de systèmes microélectroniques (LSM) du Prof. Leblebici ;
 - Laboratoire de traitement des signaux 4 (LTS4) du Prof. Frossard ;
 - Laboratoire de traitement des signaux 5 (LTS5) du Prof. Thiran ;
 - Laboratoire de circuits pour télécommunications (TCL) du Prof. Peter Burg.

◇ Institut des matériaux (IMX) :

- Domaines : Nanomédecine, nanomatériaux ;
- Groupe de recherche :
 - Laboratoire des nanomatériaux supramoléculaires et interfaces (SUNMIL) du Prof. Stellacci.

◇ Institut de microtechnique (IMT) :

- Domaines de recherche : imagerie biomédicale, algorithmes et systèmes d'apprentissage, systèmes intelligents, microsystèmes pour les technologies spatiales, photovoltaïques, couches minces électroniques, capteurs, actuateurs et microsystèmes ;

- Groupes de recherche :
 - Laboratoire de systèmes intelligents (LSI) du Prof. Floreano ;
 - Laboratoire d'électronique et traitement du signal (ESPLAB) du Prof. Farine ;
 - Laboratoire d'algorithmes et systèmes d'apprentissage (LASA) du Prof. Billard ;
 - Laboratoire d'imagerie biomédicale (LIB) Prof. Unser ;
 - Laboratoire de microsystemes 1 (LMIS1) du Prof. Brugger ;
 - Laboratoire de microsystemes 2 (LMIS2) du Prof. Gijss ;
 - Laboratoire de microsystemes 4 (LMIS4) du Prof. Renaud ;
 - Laboratoire des microsystemes pour les technologies spatiales (LMTS) du Prof. Herbert ;
 - Laboratoire de systèmes robotiques (LSRO) du Prof. Bleuler ;
 - Laboratoire de photovoltaïque et couches minces électroniques (PV-LAB) du Prof. Ballif*;
 - Laboratoire de capteurs, actionneurs et microsystemes (SAMPLAB) du Prof. de Rooij.
- Centres :
 - Swiss space center*⁹⁹. Domaines : soutien aux institutions et industrie, accès aux missions spatiales et leurs applications associées, promotions interparties prenantes, technologies et opérations spatiales, ingénierie des systèmes, engins spatiaux, microsattelites, systèmes spatiaux, simulations ;
 - Centre de micronanotechnologie (CMI)¹⁰⁰. Domaines : processus de microfabrication, microtechnologies, nanotechnologies, caractérisation de microstructures et de nanostructures, microélectrodes, microsystemes ;
 - Centre de neuroprothèse (CNP)¹⁰¹. Domaines : confluence homme-ordinateur, toucher, réalité virtuelle, robotiques, interfaces cerveau-ordinateur, monitoring de l'activité cérébrale, contrôle à distance d'équipements ou de robots, électro-encéphalogramme, stimulation non invasive, amélioration de la santé ;
 - Centre interinstitutionnel de biomécanique translationnelle (CBT)¹⁰². Domaines : orthopédie biomécanique, analyse et mesure du mouvement, thérapie régénérative ;
 - Centre d'ingénierie numérique, Application-Centered Computational Engineering Science (ACCESS)¹⁰³. Domaines : ingénierie numérique, sciences computationnelles, visualisation, simulation, dynamique moléculaire, mécanique des fluides/des solides,

⁹⁹ Site web du Swiss space center : <http://space.epfl.ch>

¹⁰⁰ Site web du CMI : <http://cmi.epfl.ch>

¹⁰¹ Site web du CNP : <http://cnp.epfl.ch>

¹⁰² Site web du CBT : <http://cbt.epfl.ch>

¹⁰³ Site web d'ACCESS : <http://acces.epfl.ch>

ingénierie biomédicale.

5.2.1.3.d Faculté Informatique et Communications (IC)

Les domaines de recherches de la Faculté Informatique et Communications (IC)¹⁰⁴ sont notamment l'algorithmique et l'informatique théorique, l'intelligence artificielle et l'apprentissage automatique, la biologie computationnelle, l'architecture informatique et les systèmes intégrés, la gestion de données et la recherche d'informations, les graphiques et la vision, l'interaction homme-machine, la théorie de l'information et des communications, les langages de programmation et les méthodes formelles, la sécurité et la cryptographie, le traitement du signal et de l'image, les systèmes et réseaux.

Les laboratoires de recherche identifiés au sein de la Faculté IC sont listés ci-dessous¹⁰⁵ :

- Laboratoire de biologie computationnelle et bioinformatique (LCBB) du Prof. Moret ;
- Groupe d'interaction immersive (IIG) du Dr. Boulic ;
- Laboratoire d'intelligence artificielle (LIA) du Prof. Faltings ;
- Laboratoire de vision par ordinateur (CV-LAB) du Prof. Fua ;
- Laboratoire de calcul neuromimétique (LCN) du Prof. Gerstner ;
- Laboratoire Systèmes et applications de traitement de données massives (DIAS) du Prof. Ailamaki ;
- Laboratoire de biorobotique (BioRob) du Prof. Ijspeert ;
- Laboratoire Conception rigoureuse des systèmes (RISD) du Prof. Sifakis ;
- Laboratoire Systèmes d'information répartis (LSIR) du Prof. Aberer ;
- Laboratoire Design et média (LDM) du Prof. Huang ;
- Laboratoire Communications audiovisuelles (LCAV) du Prof. Vetterli.

5.2.1.3.e Faculté Sciences de base (SB)

Les laboratoires de recherche identifiés au sein de la Faculté Sciences de base (SB)¹⁰⁶ sont listés ci-dessous¹⁰⁷ :

¹⁰⁴ Site web de la Faculté IC : <http://ic.epfl.ch>

¹⁰⁵ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

¹⁰⁶ Site web de la Faculté SB : <http://sb.epfl.ch>

¹⁰⁷ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

◇ Institut de mathématiques des sciences computationnelles et ingénierie (MATHICSE) :

- Domaines : simulations et modélisations mathématiques ;
- Center for Advanced Modelling Science (CADMOS) est un centre lémanique de calcul à haute performance créé en 2009 qui associe l'UNIL, l'UNIGE et l'EPFL. Son objectif est d'offrir à la communauté académique de Suisse occidentale des ressources de calcul très puissantes, mais aussi de développer les sciences computationnelles à travers toutes les disciplines.
- Domaines : sciences computationnelles, sciences informatiques, modélisation de systèmes complexes (sciences de base, sciences naturelles ou sciences humaines).
 - Groupes de recherche :
 - Chaire CADMOS de modélisation et calcul scientifique (CMCS) du Prof. Quarteroni ;
 - Chaire CADMOS Algorithmes numériques et calcul haute performance (ANCHP) du Prof. Kressner.

◇ Institut de mathématiques de géométrie et applications (MATHGEOM) :

- Domaines : simulations et modélisations mathématiques ;
- Groupe :
 - Laboratoire de mathématique algorithmique (LMA) du Prof. Shokrollahi.

◇ Institut de physique de la matière condensée (ICMP) :

- Domaines : physique de la matière complexe, nanostructures, photonique, électronique quantique, matière condensée
- Groupe :
 - Laboratoire de sciences de la Terre et des planètes (LSTP) du Prof. Gillet*.

◇ Institut des sciences et ingénieries chimiques (ISIC) :

- Domaines : chimie numérique, chimie informatique, synthèse, découverte de médicaments, diagnostics, catalyse, nanoscience, durabilité ;
- Groupes :
 - Laboratoire de photonique et d'interface (LPI) du Prof. Graetzel ;
 - Laboratoire de biotechnologie des systèmes computationnels (LCSB) du Prof. Hatzimanikatis ;
 - Laboratoire de chimie organométallique et médicinale (LCOM) du Prof. Dyson ;
 - Laboratoire de spectrométrie de masse de biomolécules (LSMB) du Prof. Tsybin.

5.2.1.3.f Collège du Management de la Technologie (CDM)

Une chaire a été identifiée au Collège du Management de la Technologie (CDM)¹⁰⁸ :

- Domaine : Management de la technologie et entrepreneuriat, management de l'innovation, commercialisation des technologies.
- Groupe :
 - Chaire en économie et management de l'innovation (CEMI) du Prof. Foray.

5.2.1.4 Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM)

Le Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM)¹⁰⁹ est un centre d'innovation et de recherche appliquée privé. Internationalement renommé, il développe et applique des plateformes technologiques à l'interface des microtechnologies, nanotechnologies et technologies de l'information et de la communication. Dans le cadre de l'Heterogeneous Technology Alliance (HTA)¹¹⁰ l'institution collabore avec le CEA/Léti¹¹¹ en France, le Fraunhofer Gesellschaft¹¹² en Allemagne et le VTT¹¹³ en Finlande, au sein d'un réseau d'excellence européen de coopération dans les microtechniques.

Basé à Neuchâtel, le CSEM mène une politique pragmatique en faveur de la création d'entreprises, considérée comme un vecteur de transformation de la recherche en innovation, qui a permis la création de multiples start-ups et compagnies dont les produits et solutions à haute valeur ajoutée ont trouvé un succès sur le marché¹¹⁴. Ses quelque 400 collaborateurs se répartissent entre le siège de Neuchâtel et les sites de Zurich, Alpnach, et Landquart.

Les principales divisions du CSEM comprennent les domaines suivants : technologie des microsystèmes, nanotechnologies et sciences de la vie, technologies biomédicales, nanomédecine, systèmes intégrés et sans fil, photonique, microélectronique, microrobotique et emballage, technologie d'impression, optique des couches minces, photovoltaïque. Les domaines de recherches identifiés au sein des divisions du CSEM sont décrits ci-dessous¹¹⁵ :

¹⁰⁸ Site web du CDM : <http://cdm.epfl.ch>

¹⁰⁹ Site web du CSEM : www.csem.ch

¹¹⁰ Site web du Heterogeneous Technology Alliance : www.hta-online.eu

¹¹¹ Site web du Léti : www-leti.cea.fr

¹¹² Site web des Fraunhofer : www.mikroelektronik.fraunhofer.de

¹¹³ Site web du VTT : www.vtt.fi

¹¹⁴ Le CSEM a permis le développement et le transfert vers l'industrie de nombreux produits dans les domaines de l'automatisation, de l'horlogerie, des technologies médicales, de la pharmaceutique, des cleantechs, de la sécurité et des transports. Voir des exemples de tels succès sur le site web du CSEM :

<http://www.csem.ch/site/card.asp?nav=2461&sub=2465&title=Start%20Dups+%26+Ventures>

¹¹⁵ Les mots clés associés à leurs activités de recherche et développement (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oikosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

- ◇ Domaines de la Division Technologie des microsystèmes (Dr. Dommann, Vice-président) :
 - Micro Electro Mechanical Systems ou MEMS (Optical MEMS, BioMEMS, PowerMEMS, RF-MEMS), couches minces, senseurs, caractérisation, revêtements, semi-conducteurs, nanotechnologie, R&D.
- ◇ Domaines de la Division Nanotechnologies et sciences de la vie (Dr. Heinzelmann, Vice-président) :
 - composants microoptiques, nanophotonique (applications lasers) ;
 - nano- et microcomposants pour des applications biologiques (nanotoxicité, implant).
- ◇ Domaines de la Division Nanomédecine (Dr. Follonier, Vice-président) :
 - nano-imagerie, surfaces bio-sélectives (adhésion à une surface/biophilie vs biophobie) ;
 - sensing médical, mesure du fonctionnement des organes, de cellules, pour la perfusion de sang, pour la respiration, design de microréacteurs cellulaires.
- ◇ Domaines de la Division Systèmes intégrés et sans-fil (Prof. Enz, Vice-président) :
 - électronique embarquée de faible consommation, traitement du signal, microélectronique, sensing intelligent, biosensing portatifs, systèmes de caméras hautement miniaturisées.
- ◇ Domaines du Centre de photovoltaïque (Prof. Ballif, chef de division) :
 - cellules de silice cristalline hautement performante ;
 - cellules et équipements solaires à couches minces ;
 - technologies de revêtement ;
 - architecture de systèmes photovoltaïque, caractérisation et simulation.

Les activités de recherches du CSEM sont financées par des fonds publics et ses plateformes technologiques sont développées conjointement avec des clients industriels et ses start-ups. Un de ses atouts pour ses clients réside sans contexte dans son expertise unique en termes de transfert technologique et de développement de solutions commerciales dans les domaines des medtechs, des cleantechs, de la sécurité, des sciences de la vie, et des télécommunications. Ces compétences lui confère une capacité à monter des partenariats public-privé permettant de développer des solutions innovantes tant pour des clients industriels que des clients étatiques, etc. De manière générale, il s'agit principalement de PME, mais aussi de multinationales (comme CIBA) et d'organisations (comme l'ESA ou RUAG Aerospace).

Le CSEM collabore activement avec les clusters de promotion des technologies de Suisse occidentale (BioAlps, AlpICT, Micronarc, CCMX, etc.). L'EPFL est un de ses partenaires clés, comme le démontre le centre de la micronanotechnologie (CMI) qui fournit des services pour le développement de technologies.

Le modèle économique du CSEM repose sur le développement d'alliances et de partenariats, en capitalisant sur son expérience reconnue, notamment dans :

- le *montage de collaboration avec des partenaires industriels* (comme BASF) pour développer des solutions innovantes ou des produits commerciaux ;
- la *coopération avec d'autres centres de recherches* (à l'image des membres de l'alliance HTA, de l'EMPA, du PSI, etc.) pour :
 - développer des solutions innovantes ou des produits commerciaux ;
 - établir des programmes de recherche conjoints ;
 - mutualiser les investissements en équipements ;
 - fournir un accès à des laboratoires de recherches communs.
- la coopération avec les universités, afin :
 - d'améliorer les compétences mutuelles de recherche via des échanges de savoirs et de bonnes pratiques ;
 - de développer les partenariats de recherche ;
 - de catalyser l'industrialisation (et surtout le succès sur le marché) de leurs idées et de leurs résultats de recherche ;
 - de financer des projets de doctorat.

Dans le cadre de la mise en place d'un simulateur d'ECA (Partie III), le modèle économique du CSEM – conjointement avec celui du SICHH – a servi d'inspiration au Centre de compétences Oïkosmos qui sera présenté au §14.

5.2.1.5 *Autres institutions de recherche suisses*

En plus de celles avec l'UNIL, du CHUV, de l'EPFL et du CSEM, la Suisse occidentale offre de nombreuses possibilités de synergies de recherche supplémentaires au vu des des autres institutions établies dans la région.

Les institutions de recherche de Suisse occidentale ci-dessous, sélectionnées parmi celles identifiées au §20.2.1, ont fait l'objet d'une recherche non exhaustive des groupes et entités de recherche pertinents¹¹⁶ pour l'établissement de synergie de recherche¹¹⁷ :

¹¹⁶ La liste des groupes de recherche pourra être complétée dans la foulée du présent travail, si pertinent.

¹¹⁷ Les mots clés associés à leurs activités de recherche (domaines, thématiques et sujets de recherche pertinents) sont intégrés au fichier Excel annexé « Oïkosmos - Parties prenantes pertinentes de Suisse occidentale ».

◇ Université de Genève (UNIGE)¹¹⁸ : 10 groupes et entités de recherche et 7 plateformes technologiques :

- Département de biologie moléculaire :
 - Groupe du Prof. Rochaix - Régulation de la photosynthèse ;
 - Groupe du Prof. Schibler - Rythmes circadiens ;
 - Groupe du Prof. Shore - Régulation des gènes ;
 - Groupe du Prof. Strasser - Didactique des Sciences (Faculté des Sciences)*.
- Département de botanique et biologie végétale :
 - Laboratoire du Prof. Strasser - Bioénergétique et Microbiologie.
- Département de chimie organique de la Faculté des sciences :
 - Groupe du Prof. Matile - Chimie organique de synthèse, chimie biologique, chimie des matériaux supramoléculaires.
- Institut des sciences du mouvement et de la médecine du sport (Prof. Kayser) de la Faculté de médecine ;
- Institut de génétique et de génomique (iGE3) (Prof. Antonarakis) du Centre Médical Universitaire (CMU) ;
- Institut F. A. Forel :
 - Groupe du Prof. Slaveykova - Biogéochimie environnementale et d'écotoxicologie ;
 - Groupe du Prof. Lehmann - Spatial Predictions and Analyses in Complex Environments – enviroSPACE*.
- Plateformes technologiques dédiées aux sciences de la vie (PTSV) de l'UNIGE : (voir description au §5.2.1.7), à savoir :
 - la Bioimaging Platform ;
 - la Genomics Platform ;
 - le DNA Sequencing Facility ;
 - le Proteomics Core Facility (PCF) ;
 - le Clinical Research Center (CRC) ;
 - le Swiss Centre for Applied Human Toxicology (SCAHT) ;
 - la Plateforme Sciences Mass Spectrometry (SMS).

◇ Université de Neuchâtel (UniNE)¹¹⁹ : 1 groupe de recherche et 1 plateforme technologique :

- Institut de biologie :
 - Laboratoire du Prof. Gobat - Sol et végétation.

¹¹⁸ Site web de l'UNIGE : www.unige.ch

¹¹⁹ Site web de l'UniNE : www2.unine.ch

- Plateforme technologique dédiée aux sciences de la vie (PTSV) :
 - Service Analytique Facultaire (SAF).
- ✧ Université de Fribourg (UniFR)¹²⁰ : 8 groupes de recherche :
 - Adolphe Merkle Institute (AMI, nanosciences)¹²¹ :
 - Groupe Bio-Nanomatériaux (Prof. Rothen-Rutishauser et Prof. Fink).
 - Département d'informatique :
 - Groupe du Prof. Ingold - Document, Image and Voice Analysis (DIVA) ;
 - Groupe du Dr. Lalanne - Interaction homme-machine.
 - Département de biologie :
 - Unité d'écologie et d'évolution du Prof. Bersier ;
 - Groupe du Prof. Métraux - Biologie des plantes.
 - Département de chimie :
 - Groupe du Prof. Bochet - Photochimie organique.
- ✧ Université de Berne (UniBE)¹²² :
 - Département de biologie :
 - Groupe du Prof. Feller – Nutrition des plantes.
- ✧ Hôpitaux universitaires de Genève (HUG)¹²³ :
 - Département de médecine génétique et de laboratoire (Prof. Hochstrasser). Domaines : protéomique, bioinformatique, découverte de biomarqueurs, médecine personnalisée, avatar médical ;
 - Département de microbiologie et de médecine moléculaire (Prof. van Delden). Domaines : microbiologie, quorum-sensing, comportement socio-microbiologique ;
 - 1 plateforme technologique dédiée aux sciences de la vie (PTSV) a été identifiée (voir §5.2.1.7), à savoir le Global Access to Health Platform (GAHP).
- ✧ Autres hôpitaux cantonaux non universitaires avec des activités de recherche :
 - l'Hôpital fribourgeois - HFR¹²⁴, via le Swiss Integrative Center for Human Health (SICHH)*, un centre de compétence en santé humaine inauguré en octobre 2013¹²⁵.

¹²⁰ Site web de l'UniFR : www.unifr.ch

¹²¹ Site web de l'AMI : www.am-institute.ch/en

¹²² Site web de l'UniBE : www.unibe.ch

¹²³ Site web des HUG : www.hug-ge.ch

¹²⁴ Site web de HFR : www.h-fr.ch

¹²⁵ Site web du SICHH : www.cish.ch

- l'Hôpital du Valais ¹²⁶ : service des maladies infectieuses (Prof. Troillet). Domaines : épidémiologie, résistance, antibiotique, médecine.
- ◇ Instituts et unités de recherche de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) :
- la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)¹²⁷ de la Haute École Vaudoise. Domaines : systèmes d'information embarqués, matériaux, génie thermique, automatisation industrielle, microtechniques et nanotechniques, technologie de l'information et de la communication, gestion de l'environnement, santé ;
 - la Haute École Arc (Berne-Jura-Neuchâtel)¹²⁸. Domaines : microtechniques industrielles, systèmes d'information et de communication, santé ;
 - l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (EIA-FR)¹²⁹ de la HES-SO Fribourg.
 - Institut de la Chimie et des sciences de la vie (Prof Naef). Domaines : chimie verte, matériaux, énergie renouvelable, molécules du domaine pharma, agro et de la chimie fine.
 - la HES-SO Genève (HES-GE)¹³⁰ :
 - INstitut Terre-Nature-Environnement (INTNE) de la Haute école du paysage, d'ingénierie et d'architecture (HEPIA) - Dr. Lefort. Domaines : plantes, pathogènes, spiruline, rythme circadien, biotechnologie végétale, production de métabolites secondaires de haute valeur ajoutée par des plantes (parfums, arômes), bioremédiation.
 - la HES-SO Valais¹³¹ :
 - Institut Technologies du vivant :
 - Prof. Crétier*. Domaines : procédés biotechnologiques, catalyse enzymatique, cellules microbiennes (bactéries, levures, moisissures) et mammifères. Construction et caractérisation des souches pour la production biotechnologique ;
 - Prof. Nicolay : Génie des procédés alimentaires, procédés de fabrication alimentaires.
 - la Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux :
 - Groupe Biologie nutritionnelle fonctionnelle du Dr. Vergères*.
- ◇ Idiap Research Institute (Institut Dalle Molle d'intelligence artificielle perceptive)¹³². Une fondation

¹²⁶ Site web de l'Hôpital du Valais : www.hopitalduvalais.ch

¹²⁷ Site web de la HEIG-VD : www.heig-vd.ch

¹²⁸ Site web de la HE-ARC : ingenierie.he-arc.ch

¹²⁹ Site web de l'EIA-FR : www.eia-fr.ch

¹³⁰ Site web de la HES-SO Genève : www.hesge.ch

¹³¹ Site web de la HES-SO Valais : www.hevs.ch

¹³² Site web de l'Idiap Research Institute : www.idiap.ch

de recherche affiliée à l'EPFL basée à Martigny. Domaines : gestion d'information multimédia, systèmes cognitifs, perception, comportement humain, interfaces d'information, reconnaissance biométrique de personne, apprentissage automatique.

✧ Autres institutions pertinentes en Suisse alémanique :

- la Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)¹³³ :
 - Département Information Technology and Electrical Engineering (D-ITET) :
 - Wearable Computing Lab du Prof. Tröster. Domaines : technologies mobiles, électronique flexible, textiles intelligents.
 - Département Health Sciences and Technology (D-HEST) :
 - Laboratoire de biotechnologie alimentaire du Prof. Lacroix.
- la Hochschule Luzern (HSLU) :
 - Centre de compétences Aerospace Biomedical Science & Technology ;
 - Groupe du Prof. Egli. Centre de soutien en biotechnologie spatiale (BIOSTEC)*
Domaines : biologie spatiale, systèmes neuroendocriniens, microgravité, single-cell protein.
- l'Institut de recherche de l'eau du domaine des EPF (EAWAG)¹³⁴ :
 - Département Microbiologie de l'environnement :
 - Groupe du Prof. Morgenroth – Ingénierie des processus dans la gestion des eaux urbaines ;
 - Unité du Dr. Kohler - Biodégradation et dissémination des polluants dans l'environnement ;
 - Groupe du Dr. Udert – Technologies de séparation à la source / récupération des nutriments*.
- l'Institut de recherche et de services interdisciplinaire des sciences des matériaux et des technologiques du domaine des EPF (EMPA)¹³⁵ :
 - Département Materials meet Life :
 - Groupe Biomatériaux du Prof. Thöny-Meyer. Domaines : biopolymère, bioplastiques, biotechnologies blanches, biotechnologies industrielles, biocatalyse, biotransformation.
- le Centre de recherche en matière de sciences naturelles et sciences de l'ingénieur de Suisse du domaine des EPF, le Paul Scherrer Institut (PSI)¹³⁶. Domaines : matériaux, santé et énergie :

¹³³ Site web de l'ETHZ : www.ethz.ch

¹³⁴ Site web de l'EAWAG : www.eawag.ch

¹³⁵ Site web de l'EMPA : www.empa.ch

¹³⁶ Site web du PSI : www.psi.ch

- Project SELF du Competence Centre for Energy and Mobility (CCEM)*. Domaines : Habitat mobile autonome CCEM-CH, systèmes préfabriqués, efficacité énergétique, sociétés à 2000 W.
- l'International Space Science Institute (ISSI)¹³⁷. La recherche multidisciplinaire de l'ISSI vise à valoriser les résultats provenant de missions spatiales, d'observations basées au sol, et d'expériences de laboratoires. Domaines: physique du système solaire, sciences planétaires, astrophysique, cosmologie, sciences de la terre, astrobiologie.
- le Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research (FMI)¹³⁸ (Prof. Gasser). Domaines : épigénétique, structure du noyaux, télomères, réplication, dynamique de la chromatine.
- la Haute École de Sciences Appliquée de Zürich - ZHAW¹³⁹ :
 - Institut de chimie et de chimie biologique (ICBC) - Prof. Sonnleitner. Domaines : développement et ingénierie de bioprocessus, contrôle, fermeture automatique des boucles de bioprocessus fed-batch haute densité, modélisation et simulation, mesures, monitoring, modélisation, contrôle.
- la Haute École d'Ingénierie de la Fachhochschule Nordwestschweiz (FHNW)¹⁴⁰. Domaines : Domaines: mécatronique, microtechnologie et instrumentation physique, technologies de capteurs, optométrie ;
- l'Institut Universitaire Kurt Bösch – IUKB¹⁴¹, en particulier l'Unité Inter- et transdisciplinarité (Theres Paulsen).

5.2.1.6 Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions suisses

Des projets de recherche, ainsi que des initiatives multipartenaires impliquant des institutions suisses pourraient s'avérer potentiellement pertinents pour l'établissement de synergies de recherche dans le cadre d'Oikosmos. Il s'agit des projets suivants, décrits ci-après :

- le Human Brain Project (§5.2.1.6.a) ;
- l'initiative SystemsX.ch (§5.2.1.6.b) ;
- le projet Nano-Tera (§5.2.1.6.c) ;
- le centre Smart Living Lab (§5.2.1.6.d) ;

¹³⁷ Site web de l'ISSI : www.issibern.ch

¹³⁸ Site web du FMI : www.fmi.ch

¹³⁹ Site web de ZHAW : www.zhaw.ch

¹⁴⁰ Site web de la Haute École d'Ingénierie de la FHNW : www.fhnw.ch/technik-fr/accueil?set_language=fr

¹⁴¹ Site web de l'IUKB : www.iukb.ch/

- le Swiss Integrative Center for Human Health (§5.2.1.6.e) ;
- le projet EssentialTech (§5.2.1.6.f) ;
- le programme Anthropos (§5.2.1.6.g) ;
- la plateforme Ethos (§5.2.1.6.h).

5.2.1.6.a Le Human Brain Project

En 2013, la Commission européenne a consacré le projet *Human Brain Project*¹⁴² piloté par l'EPFL et qui devrait recevoir un milliard d'euros sur dix ans¹⁴³. C'est l'un des deux projets phares de recherche de l'initiative « Flagship FET »¹⁴⁴, à savoir les projets « amiraux » sur les « technologies émergentes du futur ». Ce projet extrêmement ambitieux implique les efforts collectifs de concerne plus de 70 laboratoires issus de 23 pays européens. Il visera à simuler le cerveau humain en combinant les compétences dans les domaines de la médecine, des neurosciences et des sciences d'informatiques. L'UNIL n'est pas en reste, puisqu'elle collaborera activement à ce projet au côté du CHUV. Selon Dominique Arlettaz, recteur de l'UNIL, « ce succès montre une fois de plus l'excellente collaboration entre l'UNIL, le CHUV et l'EPFL et la force de la place scientifique lausannoise. Le volet médical du Human Brain Project, dirigé par le Prof. Richard Frackowiak, est un atout indispensable à l'ensemble du projet et aura des retombées extrêmement positives sur la recherche en neurologie effectuée à l'Université de Lausanne »¹⁴⁵. Le Human Brain Project ambitionne de se positionner comme le futur CERN dédié à la compréhension du cerveau.

Dans le cadre du Human Brain Project, d'intéressantes synergies avec un simulateur d'ECA sont envisageables dans le suivi dynamique de l'évolution du système nerveux des membres de l'équipage sur une longue période, dans l'utilisation des technologies d'imagerie (tomographie, PET), etc.

Signalons que les institutions de Suisse occidentale étaient par ailleurs fortement impliquées dans quatre des six derniers projets amiraux encore en liste à la fin 2012. Ceci démontre les capacités scientifiques de la région lémanique, habituée à se positionner et à déployer des projets internationaux d'envergure (voir §20.1).

Domaines de recherche : neurosciences, sciences de la vie, bioimagerie, simulation, bioinformatique (voir en particulier le §9.2.1 sur la modélisation mathématique de systèmes complexes).

¹⁴² The Human Brain Project à l'EPFL : <http://bluebrain.epfl.ch/page-52741-en.html>

¹⁴³ Lire le communiqué de presse de l'EPFL du 28.01.2013, « Le Human Brain Project consacré par la Commission européenne » : <http://actu.epfl.ch/news/le-human-brain-project-consacre-par-la-commission/>

¹⁴⁴ Une vingtaine de propositions étaient au départ sur les rangs pour l'initiative FET Flagship (projets-phare des technologies futures et émergentes) récompensant les initiatives de recherche visionnaires et innovantes.

¹⁴⁵ Lire le communiqué de presse de l'UNIL du 28.01.2013, « L'Europe mise sur le cerveau » : www.unil.ch/actu?showActu=1359370001171.xml

5.2.1.6.b L'initiative SystemsX.ch

L'initiative de recherche suisse en biologie des systèmes, *SystemsX.ch*¹⁴⁶. Constitué de douze institutions partenaires (EPFL, ETHZ, universités de Bâle, de Berne, de Fribourg, de Genève, de Lausanne, de Neuchâtel et de Zurich, le FMI, le PSI et le SIB), ce réseau unique favorise une collaboration interdisciplinaire et efficace entre plus de 300 groupes de recherche et travaillant à plus d'une centaine de projets distincts, avec des projets spécifiques ou interdisciplinaires liés à la bioinformatique à l'imagerie cellulaire, la biologie végétale, aux neurosciences, au métabolisme, à la microbiologie.

SystemsX.ch fournit le réseau et les plateformes technologiques nécessaires pour favoriser la coopération étroite entre biologistes, physiciens, chimistes, mathématiciens, informaticiens et de médecins pour la prédiction du fonctionnement des systèmes biologiques à différentes échelles, en particulier pour suivre le comportement d'un organe (animal ou végétal) dans son ensemble, et prédire les réactions à de stimulations endocriniennes ou les effets de perturbations extérieures (voir le §7.3.3.1.a sur l'exposome).

L'initiative déploie sa deuxième phase avec un financement fédéral supplémentaire à hauteur de 25 millions par année pour la phase de consolidation (2012-2016), en plus des 100 millions accordés pour la période de lancement 2009-2012. La qualité de l'initiative dans son ensemble, ainsi que celle des projets individuels, est contrôlée par le Fonds National Suisse pour la recherche scientifique. Cet organisme de contrôle indépendant garantit et promeut la compétitivité de l'initiative. D'un point de vue légal, SystemsX.ch est un simple partenariat.

Domaines de recherche : biologie des systèmes, bioinformatique, imagerie cellulaire, biologie végétale, neurosciences, métabolisme, microbiologie, réponse à l'exposome (voir en particulier le §8 sur la biologie systémique).

5.2.1.6.c Le projet Nano-Tera

Le projet *Nano-Tera*¹⁴⁷ est une initiative nationale cherche à positionner la Suisse au front des futurs changements de paradigme technologiques, en utilisant l'ingénierie et les technologies de l'information pour améliorer la santé et la sécurité et la performance environnementale et énergétique globale. Pour ce faire, elle mène et coordonne des projets de collaboration au sein d'institutions suisses incluant l'EPFL, CSEM, l'UNIGE, l'UNINE en Suisse occidentale et l'ETHZ, les Universités de Bâle et de Lugano au niveau national. Les projets étudient les systèmes complexes multi-échelles à l'interface des

¹⁴⁶ Site web de SystemsX.ch : www.systemsx.ch/fr/

¹⁴⁷ Site web de Nano-Tera, « engineering complex systems for health, security, energy and the environment » : www.nano-tera.ch/index.php#

disciplines traditionnelles comme les sciences de la vie et de la communication, le génie électrique et des technologies hardware et software dans le domaine des systèmes embarqués, portables, environnementaux et énergétiques (voir le §9 sur les technologies de l'information et de la communication). Avec près de 700 chercheurs, 27 partenaires industriels et plus d'une centaine de thèses, Nano-Tera.ch a d'ores et déjà accompli des succès dans les domaines du biosensing, du design d'implants médicaux, et de systèmes de monitoring environnementaux.

Les exemples de projets Nano-Tera qui semblent pourraient présenter des synergies avec le programme Oïkosmos incluent par exemple :

- Suivi thérapeutique de l'administration de médicaments (Therapeutic drug monitoring - TDM) du Prof. Buclin (EPFL)¹⁴⁸. Domaines de recherche : pharmacologie clinique, toxicologie clinique, effets indésirables, analyses et mesures pharmacocinétiques, voies métaboliques, suivi thérapeutique, analyse de données.
- Systèmes intégrés intelligents pour des applications de médecine personnalisée (Intelligent Integrated Systems for Personalized Medicine - ISyPeM)¹⁴⁹ du Prof. Guiducci (EPFL). Domaines de recherche : biopuce 3D, biomonitoring, électrodes 3D, détection moléculaire en surface, détection et caractérisation cellulaire, sensing aux interfaces (impédance), détection de biomolécules en temps réel, nanocircuit.

5.2.1.6.d Le centre Smart Living Lab

Le futur centre de recherche *Smart Living Lab (SLL)*, une structure commune à l'EPFL, l'Université et l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg¹⁵⁰, qui prendra place au futur parc technologique et d'innovation blueFACTORY¹⁵¹ à Fribourg (sur le site de l'ancienne brasserie Cardinal). Le SSL vise à « développer les technologies qui équiperont les bâtiments intelligents de demain et réaliser un premier édifice exemplaire », dans une perspective fortement interdisciplinaire.

Domaines de recherche : habitat intelligent, bâtiment/habitat du futur, (éco)matériaux (voir le §10 sur l'habitat clos et durable).

¹⁴⁸ Description du projet TDM : www.chuv.ch/pcl/pcl_home/pcl-research/pcl-research-tdm.htm

¹⁴⁹ Description du projet IsyPeM : <http://clse.epfl.ch/page-77501-en.html>

¹⁵⁰ « Fribourg et l'EPFL main dans la main sur le site de blueFACTORY », communiqué de presse du 23.04.2013 : http://www.bluefactory.ch/wp-content/uploads/2013/04/2013-04-16_communique_CE-EPFL_F.pdf

¹⁵¹ Site web du blueFACTORY : www.bluefactory.ch

5.2.1.6.e Le Swiss Integrative Center for Human Health

Le centre de compétence en santé humaine *Swiss Integrative Center for Human Health (SICHH)*¹⁵² fondé par l'Université de Fribourg, en partenariat avec l'Hôpital Fribourgeois. Également basé au blueFACTORY, le SICHH « mettra à disposition des entreprises, des scientifiques et des cliniciens un matériel de pointe et des compétences hautement spécialisées dans les domaines de la technologie médicale (MedTech), de la biotechnologie (BioTech), de la pharma, ainsi que dans tous les domaines liés à la santé humaine »¹⁵³.

Domaines de recherche : sciences de la santé, santé humaine, hautes technologies, medtech, biotechnologie, génomique, protéomique, biomédecine, science des matériaux, soutien à l'innovation, interaction homme-machine, analyse, interprétation, modélisation et simulation de données (la plupart de ces thèmes seront traités aux §8 et §9).

Conjointement avec celui du CSEM, le modèle économique du SICHH a servi d'inspiration au Centre de compétences Oïkosmos qui sera présenté au §14.

5.2.1.6.f Le projet EssentialTech

Le projet *EssentialTech* à l'EPFL¹⁵⁴, qui s'intéresse aux technologies essentielles pour réduire la pauvreté, c'est-à-dire des « technologies robustes, bon marché, adaptées au contexte des pays pauvres ». Les défis posés par ces technologies impliquent de nouvelles façons de concevoir les produits, en raison des contraintes du sud (coûts, conditions environnementales et rareté des ressources) qui ne doivent pas être confondues avec comme de low tech (par opposition à high tech). Dans la perspective de déployer de manière durable de telles solutions, des synergies intéressantes avec le projet Oïkosmos sont envisageables à terme, dans les technologies liées à l'eau potable (traitement décentralisé des eaux usées, voir §7.4.2), à la nutrition (§8.3.2) ou aux technologies de l'information et de la communication (voir §9.4 sur la télésanté).

5.2.1.6.g Le programme Anthropolos

Le programme *Anthropolos*¹⁵⁵ à l'UNIL (sous la responsabilité du vice-recteur « Recherche ») s'intéresse à l'homme et le vivant dans leur environnement naturel et social. Le projet cherche à « favoriser

¹⁵² Site web provisoire du SICHH : www.cish.ch/fr

¹⁵³ « Centre de compétence unique en santé humaine: le SICHH est prêt à intégrer la blueFactory », communiqué de presse du 11.04.2013 : www.cish.ch/assets/files/Dossier_Presse_SICHH1.pdf

¹⁵⁴ Site web du projet EssentialTech : <http://cooperation.epfl.ch/essential-fr>

¹⁵⁵ Site web du programme Anthropolos : www.unil.ch/anthropolos

l'échange entre disciplines et pour développer l'innovation au-delà de la logique facultaire en réponse à des questions de la société ». Un label Anthropos est attribué aux dossiers répondant aux critères du projet (orientation de la recherche vers des thématiques novatrices ou émergentes, interdisciplinarité, originalité, logique transfacultaire). Un tel label pourrait contribuer à valoriser synergies de recherche lors d'éventuelles prochaines étapes du projet Oïkosmos dans la région.

Domaines de recherche : dialogue avec la société civile (voir §13 sur le Forum Oïkosmos), interdisciplinarité (voir §16 sur le simulateur d'ECA en tant que plateforme intégrative favorisant l'interdisciplinarité).

5.2.1.6.h La plateforme Ethos

Ethos est une plateforme de recherche d'éthique interdisciplinaire qui associe les chercheurs en sciences humaines, sciences sociales et sciences de la nature, et les acteurs de la société civile pour conduire une réflexion sur de grands enjeux contemporains¹⁵⁶. Basée à l'UNIL, elle collabore avec l'Interface Sciences-Société et des partenaires privilégiés comme le CHUV et l'EPFL. *Ethos* stimule les collaborations en fédérant les compétences des Facultés de l'UNIL au travers de l'organisation de colloques et la conduite de recherches interdisciplinaires sur le plan national et international. En outre, *Ethos* assure la présence de l'éthique interdisciplinaire dans la formation continue.

Domaines de recherche : éthique des sciences et des techniques (voir en particulier le §11 sur les aspects éthiques de la vie en habitat clos), écologie, finitude.

5.2.1.7 Plateformes technologiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie

La Suisse occidentale possède une trentaine de plateformes technologiques dédiées aux sciences de la vie. Ces installations et infrastructures académiques ont été identifiées en parallèle à l'établissement de l'agenda de recherche, lors de la cartographie des acteurs de l'innovation en Suisse occidentale effectuée dans la Partie IV du présent rapport (§20.2.2). Ces plateformes technologiques proposent de nombreuses activités et services qui pourraient s'avérer pertinents dans le contexte d'Oïkosmos :

◇ Imagerie :

- la *Bioimaging Platform*¹⁵⁷ de l'UNIGE du National Centres of Competence in Research

¹⁵⁶ Site web de la plateforme Ethos : www.unil.ch/ethos

¹⁵⁷ Site web de la Bioimaging platform de l'Unige : <http://bioimaging.frontiers-in-genetics.org>

(NCCR) « Frontiers in Genetics »¹⁵⁸. Intérêt : analyses microscopique, histologique et ultrastructurale, caractérisation structurale de matériel tissulaire humain, animal et végétal, analyses morphologiques de cellules, de bactéries, d'organelles, de protéines ; fluorescence, bioluminescence et immunofluorescence ;

- le *Cellular Imaging Facility* (CIF)¹⁵⁹ du CHUV et de l'UNIL. Intérêt : microscopie confocale ;
- l'*Electron Microscopy Facility* (EMF)¹⁶⁰ de l'UNIL. Intérêt : microscopie électronique à transmission; cryo-ultramicrotomie; immuno-labeling; tomographie électronique ;
- le *BioEM Facility*¹⁶¹ de l'EPFL. Intérêt : microscopie électronique, immunocytochimie ;
- la *BioImaging & Optics platform* (PT-BIOP)¹⁶² de l'EPFL. Intérêt : microscopie optique.

✧ Génomique et bioinformatique :

- le *Genomic Technologies Facility* (GTF)¹⁶³ de l'UNIL. Intérêt : caractérisation et analyse de génome, de transcriptome, profilage d'expression d'ARNm et de microARN, DNA microarrays, séquençage nouvelle génération, analyse PCR quantitative en temps réel ;
- le *Bioinformatics and Biostatistics Core Facility* (BBCF)¹⁶⁴ de l'EPFL. Intérêt : bioinformatique, biostatistiques, séquençage de génome entier ; gestion de grandes quantités de données génomiques: séquençage, puces à ADN ; analyse de données ChIP-Seq et de l'ARN-Seq : génomique fonctionnelle ; reséquençage de génome complet: caractérisation de mutants, identification des souches, génétique ;
- la *Genomics Platform*¹⁶⁵ de l'UNIGE du NCCR « Frontiers in Genetics ». Intérêt : génomiques, puces à ADN, ARN, RT PCR, séquençage, transcriptomique, génotypage, épigénétique, structure chromatinienne ;
- le *DNA Sequencing Facility*¹⁶⁶ de l'UNIGE. Intérêt : séquençage de l'ADN.

✧ Protéomique :

- le *Protein Analysis Facility* (PAF)¹⁶⁷ de l'UNIL. Intérêt : protéomique, électrophorèse 2D-PAGE, cartographie peptidique, profilage protéomique pour la comparaison des lignées cellulaires, des mutants, des cellules stimulées vs non stimulées ; analyse de complexes protéiques (pull-down ou immunoprécipitations) ; spectrométrie de masse (MALDI,

¹⁵⁸ Site web du NCCR Frontiers in genetics : www.frontiers-in-genetics.org/page.php?id=home_en

¹⁵⁹ Site web du CIF : www.unil.ch/cif

¹⁶⁰ Site web de l'EMF : www.unil.ch/emf

¹⁶¹ Site web du BioEM Facility : <http://cime.epfl.ch/page-26765.html>

¹⁶² Site web du PT-BIOP : <http://biop.epfl.ch/>

¹⁶³ Site web du GTF : www.unil.ch/daf1

¹⁶⁴ Site web du BBCF : <http://bbcf.epfl.ch>

¹⁶⁵ Site web de la Genomics platform : <http://genomics.frontiers-in-genetics.org>

¹⁶⁶ Site web du DNA Sequencing Facility : www.medgen.unige.ch/research/dna.html

¹⁶⁷ Site web du PAF : www.unil.ch/fbm/page7415_fr.html

électrospray, LC-MS, etc.); digestion, identification et quantification de protéines ; modifications post-traductionnelles, avec marquage métabolique (SILAC) ; optimisation de la conception expérimentale ; (ré-)analyse, exploration et interprétation de données ; contrôle de la qualité ; détermination de la composition et de changements dynamiques dans les compartiments cellulaires (mitochondries, noyaux, etc.) ; détermination de site de phosphorylation, profilage phosphoprotéome de cellule entière ;

- le *Proteomics Core Facility* (PCF)¹⁶⁸ de l'EPFL. Intérêt : spectrométrie de masse, protéomique, analyse, identification et quantification des protéines, lipidomique, analyse post-traductionnelle des protéines ;
- le *Proteomics Core Facility* (PCF) de l'UNIGE¹⁶⁹. Intérêt : identification des protéines par spectrométrie de masse, séparation des protéines par gel électrophorétique 2D ;
- le *Protein and Peptide Chemistry Facility* (PPCF)¹⁷⁰ de l'UNIL. Intérêt : synthèse de peptides, peptides array; high throughput screening, spectrométrie de masse, détection et quantification de biomarqueurs ; cartographie des épitopes ; interactions protéine-protéine, interactions récepteur-ligand, activités enzymatiques (kinases), études de liaison de métaux ; détection et quantification de protéines dans des échantillons cliniques (biofluides et tissus) ;
- le *quantitative Mass Spectrometry Facility* (qMSF)¹⁷¹ de l'UNIL. Intérêt : analyse LC-MS, spectrométrie de masse, peptides, drogues, pharmacocinétique, screening.

◇ Modèles animaux :

- le *Cardiovascular Assessment Facility* (CAF)¹⁷² de l'UNIL. Intérêt : évaluation cardiovasculaire (souris et rats); microchirurgie (infarctus du myocarde, constriction transaortique), modèles physiopathologiques ; échographie (fonction ventriculaire gauche et les dimensions, Doppler, ultrasons, arythmies) ; phénotypage ; pression artérielle et fréquence cardiaque (méthodes non invasives et invasives) implants à pompe osmotique ; prélèvement sanguin et tissulaire ;
- le *Histology Core Facility* (HCF)¹⁷³ de l'EPFL. Intérêt : histologie, tissus, coloration, immunofluorescence, immunohistochimie ;
- le *Mouse Metabolic Facility* (MEF)¹⁷⁴ de l'UNIL et du CHUV. Intérêt : homéostasie

¹⁶⁸ Site web du PCF : <http://pcf.epfl.ch>

¹⁶⁹ Site web du PCF : www.expasy.org/ch2d/service/

¹⁷⁰ Site web du PPCF : www.unil.ch/ib/page9229.html

¹⁷¹ Site web du qMSF : www.unil.ch/qmsf

¹⁷² Site web du CAF : www.unil.ch/caf

¹⁷³ Site web du HCF : <http://hcf.epfl.ch>

¹⁷⁴ Site web du MEF : www.cardiomet.ch/cmet_home/cardiomet-chercheurs.htm

énergétique, obésité, apport alimentaire; analyse du métabolisme par calorimétrie indirecte, évaluation de l'équilibre énergétique, détection des variations de l'absorption et du stockage de l'énergie, ainsi que de la dépense énergétique: analyse non invasive de la composition corporelle, incluant le suivi de l'alimentation, de la boisson, de la production de chaleur, de l'oxydation de glucides / lipides et de l'activité locomotrice, thermoneutralité, froid, télémétrie de la température corporelle et de l'activité locomotrice; tapis roulant métabolique pour des études de physiologie; teneur en énergie des selles, mesure de la prise alimentaire; homéostasie du glucose: études de diabète; pince glycémique, action et sécrétion de l'insuline, contre régulation ; étude du cerveau : crosstalk périphérique dans le contrôle du métabolisme: injections intracérébrales de médicaments, peptides et virus (intracérébroventriculaire, intrahypothalamique) ; chimie du sang ; hormones; cytokines ;

- le *Mouse Pathology Facility* (MPF)¹⁷⁵ de l'UNIL et du CHUV. Intérêt : analyse de souris transgénique, knockout, analyse d'organes de souris, pathologie, histologie, immunohistochimie, section de tissus congelés, techniques de coloration histochimique ;
- le *Transgenic Animal Facility* (TAF)¹⁷⁶ de l'UNIL et du CHUV. Intérêt : technologies transgéniques, génération de souris transgéniques, ciblage de gène, knockout, knockin, transgénèse, recombinaison homologue, redérivation de lignées transgéniques, souris mutantes, microinjection, électroporation, injection de cellules souches embryonnaires dans des blastocystes, isolement d'embryons , congélation de sperme, stratégies de reproduction.

◇ Études humaines :

- le *Clinical epidemiology Center* (CepiC)¹⁷⁷ de l'UNIL et du CHUV. Intérêt : support statistique, épidémiologie, recherche clinique, étude phase I à IV, essais cliniques ;
- le *Clinical Research Center* (CRC)¹⁷⁸ de l'UNIL et du CHUV. Intérêt : métabolisme; investigation métabolique (études de dilution isotopique, calorimétrie indirecte, biopsies musculaires ou de la peau); investigation clinique cardiovasculaire (détection d'athérosclérose par échographie, mesures de plaques d'athérome, de flux cutané, de pression veineuse centrale, de rigidité artérielle, du débit sanguin cérébral, de la fonction endothéliale); support administratif au remplissage et au dépôt de demandes à divers organismes officiels (comités d'éthique, organismes de réglementation fédéraux, etc.) ;

¹⁷⁵ Site web du : www.unil.ch/mpf

¹⁷⁶ Site web du TAF : www.unil.ch/taf

¹⁷⁷ Site web du CepiC : www.chuv.ch/cepic

¹⁷⁸ Site web du CRC : www.cardiomet.ch

- le *Clinical Research Center (CRC)*¹⁷⁹ de l'UNIGE. Intérêt : recherche clinique, recherche orientée patient, essais de drogues ;
- le *Global Access to Health Platform (GAHP)*¹⁸⁰ des HUG. Intérêt : santé globale, accès à la santé et aux soins, coopération internationale, communauté de pratique ;
- le *Swiss Centre for Applied Human Toxicology (SCAHT)*¹⁸¹ de l'UNIGE. Intérêt : toxicologie humaine appliquée, toxicologie prédictive, neurotoxicologie, toxicologie de la reproduction, dermatotoxicologie, toxicopathologie, carcinogenèse, toxicologie analytique, nano-toxicologie toxicologie sur le lieu de travail, biomarqueurs, toxicologie clinique, évaluation des risques.

◇ Criblage biomoléculaire :

- le *Biomolecular Screening Facility (BSF)*¹⁸² de l'EPFL. Intérêt : criblage à haut débit, tests cellulaires et in vitro, interférence par ARN (ARNi) criblage pour sonder la fonction des gènes à l'aide de petits ARN interférents (pARNi, siRNA) ; dépistage de produits chimiques (petites molécules et de produits naturels) pour une variété de tests biochimiques et cellulaires.

◇ Cytométrie de flux :

- le *Flow Cytometry Core Facility (FCCF)*¹⁸³ de l'EPFL. Intérêt : cytométrie, tri, isolement, purification de population cellulaire ; acquisitions et analyses de données : cycle cellulaire, apoptose, modifications, expression et localisation des protéines, prolifération, surface cellulaire, antigènes intracellulaires; expressions de cytokines.

◇ Expression des protéines :

- le *Protein Expression Core Facility (PECF)*¹⁸⁴ de l'EPFL. Intérêt : transfection à grande échelle de cellules de mammifères, scale-up de lignées cellulaires recombinantes et non recombinantes et d'hybridomes: production rapide de protéines recombinantes ; production de protéines recombinantes dans E. coli ; anticorps monoclonaux ; chromatographie d'affinité.

◇ Analyse chimique :

- le *Service Analytique Facultaire (SAF)*¹⁸⁵ de l'UNINE. Intérêt : détermination de structure moléculaire, spectrométrie de masse, HPLC, LC-MS, GC-MS. NMR spectroscopie, diffraction RX, cristallographie ;

¹⁷⁹ Site web du CRC : <http://crc.hug-ge.ch/>

¹⁸⁰ Site web du GAHP : <http://globalaccesstohealth.net>

¹⁸¹ Site web du SCAHT : www.scaht.org

¹⁸² Site web du BSF : <http://bsf.epfl.ch>

¹⁸³ Site web du FCCF : <http://fccf.epfl.ch>

¹⁸⁴ Site web du PECF : <http://pecf.epfl.ch>

¹⁸⁵ Site web du SAF : www2.unine.ch/saf

- la plateforme *Sciences Mass Spectrometry (SMS)*¹⁸⁶ de l'UNIGE. Intérêt : spectrométrie de masse, SM profiling, quantification, molécules organiques, biopolymères, systèmes supramoléculaires, détermination de composition élémentaire.

5.2.2 Sélection des domaines clés favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale

Sur la base de la revue des domaines de recherche identifiés au §5.2.1, les domaines clés de Suisse occidentale suivants ont été sélectionnés :

✧ Sciences de la vie :

- biologie :
 - biologie systémique (sciences « omiques ») : génomique, protéomique et métabolomique ;
 - bioinformatique, biologie computationnelle des systèmes ;
 - bioingénierie, simulations et modélisations biomoléculaires, imagerie biomédicale, bioimagerie, neurosciences ;
 - biologie végétale, métabolisme végétal, nutrition des plantes.
- médecine :
 - médecine génomique, médecine personnalisée, biomédecine, médecine moléculaire et translationnelle ;
 - physiologie humaine : métabolisme humain, sommeil, rythmes circadiens, sciences du mouvement et de la médecine du sport, physiologie de l'exercice, homéostasie énergétique ;
 - alimentation : nutrition fonctionnelle, nutriginomique, biotechnologies alimentaires ;
 - sciences de l'exposition : santé au travail, analyse (bio)chimique par spectrométrie de masse, analyses et mesures pharmacocinétiques, suivi thérapeutique de l'administration de médicaments, toxicologie clinique.

✧ Sciences, technologies et ingénierie de l'environnement :

- écologie industrielle :
 - analyse de flux de matières et d'énergie, écobilans ;
 - écotecnologies, cleantech, efficacité énergétique ;
- pollution de l'environnement naturel et construit :
 - transformation des polluants, techniques de remédiation, toxicologie de

¹⁸⁶ Site web du SMS : www.ms.unige.ch/sms

l'environnement, écotoxicologie moléculaire ;

- microbiologie environnementale, bioremédiation, traitements naturels ;
- habitat durable, bâtiments autonomes.

◇ Ingénierie :

- microtechnologies vertes : photovoltaïque, traitement de l'eau ;
- ingénierie de précision : processus de microfabrication, miniaturisation du hardware ;
- microélectronique et systèmes intelligents : microsystèmes électromécaniques intégrés (BioMEMS, EnviroMEMS), électronique embarquée de faible consommation.

◇ Technologies de l'information et de la communication :

- nouvelles technologies de l'information et de la communication : informatique mobile et ubiquitaire, technologies mobiles, systèmes de communication sans fil, systèmes d'information embarqués, biosensing portatifs ;
- smart monitoring : senseurs et capteurs intelligents, réseaux de capteurs sans fil, télédétection, système d'information géographique;
- habitat intelligent : bâtiments intelligents, automation du bâtiment, domotique ;
- ingénierie informatique et communicationnelle :
 - data mining, traitement de l'image, visualisation de l'information, systèmes d'information multimédia, traitement de signaux biomédicaux ;
 - sciences et technologies de l'interaction : interfaces homme-machine, réalité augmentée, vision par ordinateur, systèmes de caméras hautement miniaturisés ;
- sciences computationnelles et sciences informatiques : modélisation de systèmes complexes, modélisation dynamique, intelligence artificielle, apprentissage automatique.

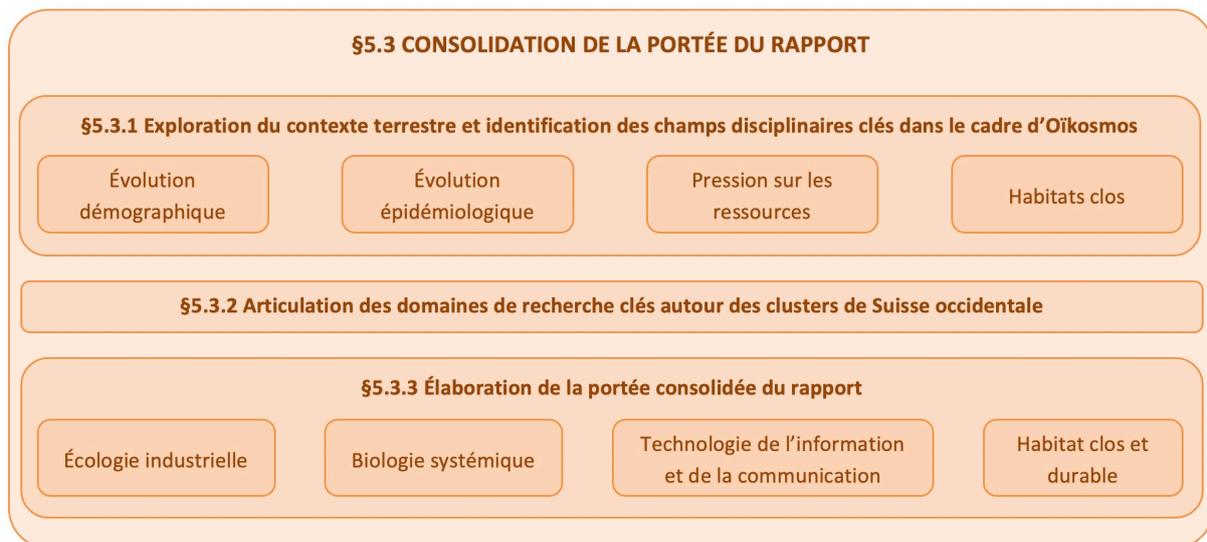
◇ Sciences humaines :

- psychologie : psychosociologie, comportement en groupe, processus de coopération, sociologie (communication, interdisciplinarité) ;
- systèmes d'aide à la décision, comportement organisationnel ;
- management de la technologie, management de l'innovation.

5.3 Consolidation de la portée du rapport

Suite à ce catalogage des domaines favorisant les synergies de recherche en Suisse occidentale, la portée du rapport a été ensuite consolidée grâce aux activités suivantes :

- l'exploration du contexte terrestre et l'identification des champs disciplinaires clés dans le cadre d'Oïkosmos (§5.3.1) ;
- l'articulation des domaines de recherche clés autour des clusters de Suisse occidentale (§5.3.2) ;
- sur cette base, l'élaboration de la portée consolidée du rapport (§5.3.3).



5.3.1 Exploration du contexte terrestre et identification des champs disciplinaires clés dans le cadre d'Oïkosmos

Tout d'abord, l'exploration du contexte terrestre a été effectuée, sur la base :

- d'un approfondissement de la portée préliminaire élaborée au (Eckart 1997; Suomalainen 2012) ;
- d'un approfondissement des domaines de recherche clés en Suisse occidentale compilés au 5.2.2 ;
- d'une revue de littérature complémentaire, effectuée en parallèle aux entretiens avec les groupes de recherche rencontrés lors du rapport (voir bibliographie).

Ces activités ont permis l'identification de tendances lourdes renforçant la pertinence du programme Oïkosmos, à savoir :

- l'évolution démographique : une population européenne vieillissante (§6.1.1) ;
- l'évolution épidémiologique : une population européenne affectée par des maladies chroniques, exposée à des pollutions environnementales, et présentant des comportements à risque (§6.1.2) ;
- l'amélioration de la performance environnementale : une progression indispensable dans un contexte d'augmentation continue de la pression sur les ressources (§6.1.3) ;
- la croissance des contraintes auxquelles seront soumis les habitats terrestres de demain, c'est-à-dire dans la perspective des habitats clos (§6.1.4).

Il ressort de cette activité que les domaines de recherches clés pour le programme Oïkosmos peuvent être regroupés en trois *champs disciplinaires* en plein essor ces dernières années :

- l'écologie industrielle (§6.2) ;
- la biologie systémique et des sciences « omiques » (§6.3) ;
- les technologies de l'information et de la communication (§6.4).

D'autre part, dans la perspective des habitats clos, un quatrième domaine semble s'avérer de circonstance pour Oïkosmos, il s'agit de notion d'habitat clos et durable (§10). Les thématiques connexes à cette notion font appel aux champs de recherche de l'écologie industrielle (éco-habitat, habitat autonome, habitat autosuffisant), de la biologie systémique (habitat sain) et des technologies de l'information et de la communication (habitat intelligent).

5.3.2 Articulation des domaines de recherche clés autour des clusters de Suisse occidentale

Sur la base des domaines identifiés lors des activités précédentes (§5.2), les clusters technologiques de Suisse occidentale et les clusters de promotion des technologies clés associés ont ensuite été sélectionnés parmi les clusters stratégiques présentés respectivement aux §20.2.3 et §20.2.4 (Partie IV).

Les clusters technologiques clés de Suisse occidentale sont :

- l'énergie et l'environnement ;
- les biotechnologies et la pharmacie ;
- la nutrition et les produits de grande consommation ;
- les technologies médicales et les hautes technologies liées à la santé ;
- les micro et nanotechnologies et l'ingénierie de précision ;
- les technologies de l'information et de la communication.

Les clusters de promotion des technologies clés associés sont :

- *CleantechAlps* : écotechnologies, cleantech ;
- *Energie-Cluster* : énergie, écotechnologies ;
- *BioAlps* : sciences de la vie, biotechnologie, medtech ;
- *Medical Cluster* : technologies médicales ;
- *Swiss Food Research* : industrie agroalimentaire ;
- *Micronarc* : micronanotechnologies, ingénierie de précision ;
- *Cluster précision* : industrie de précision, microtechnologies ;
- *AlpICT* : technologie de l'information et de la communication ;
- *Information Systems & IT Cluster (ISIS)* : systèmes d'information, multimédia, applications et sécurité informatique.

Ensuite, les domaines de recherche clés (§5.2.2) ont été compilés et articulés autour des clusters clés de Suisse occidentale listés ci-dessus, afin d'établir la portée consolidée du rapport. Cette intégration met en évidence le potentiel et la pertinence des synergies de recherche avec les institutions académique de la région lémanique (Partie II), ainsi que les arguments de la Suisse occidentale crédibilisant et justifiant un positionnement stratégique futur pour l'hébergement du démonstrateur au sol (Parties III et IV). Relevons à ce stade que la plupart des clusters scientifiques et technologiques de la région peuvent être considérés comme pertinents, d'une manière ou d'une autre, pour l'étude des ECA.

La portée consolidée est exposée au prochain chapitre.

5.3.3 Portée consolidée du rapport : domaines de recherche clés

La portée consolidée est composée des domaines de recherche clés articulés autour des clusters clés de Suisse occidentale et est découpée selon les quatre champs suivants:

- l'écologie industrielle (§5.3.3.1) ;
- la biologie systémique (§5.3.3.2) ;
- les technologies de l'information et de la communication (§5.3.3.3)
- l'habitat clos et durable (§5.3.3.4).

5.3.3.1 *Écologie industrielle*

- Domaines de recherche clés (et chapitres associés de l'agenda de recherche) :
 - écologie industrielle (§6.2, §7.2), écologie scientifique, homéostasie des écosystèmes (§7.3.4.3) ;
 - sciences de l'exposition (« exposome », §7.3.3.1.a), écotoxicologie et sciences moléculaires de l'environnement (§7.3.3.1.b), santé de l'environnement intérieur et santé au travail (§7.3.3.2.c) ;
 - écotecnologies (§7.4) : valorisation des déchets organiques, purification de l'eau (§7.4.2), régénération de l'air, valorisation du dioxyde de carbone (§7.4.3), bioraffinage (§7.4.4) ;
 - connexes avec la notion d'habitat clos et durable : éco-matériaux (§10.2), habitat autosuffisant (§10.3, lien avec la biologie systémique), habitat autonome (§10.4), habitat sain (§10.5, lien avec la biologie systémique).
- Institutions clés de Suisse occidentale :
 - UNIL (FGSE) (§5.2.1.1.b) ;
 - EPFL (ENAC, STI) (§5.2.1.3.a, §5.2.1.3.c).
- Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions de Suisse occidentale :
 - Smart Living Lab (§5.2.1.6.d) ;
 - EssentialTech (§5.2.1.6.f).
- Clusters technologiques de Suisse occidentale (§20.2.3) :
 - l'énergie et l'environnement ;
 - les micro- et les nanotechnologies et ingénierie de précision.
- Clusters de promotion des technologies de Suisse occidentale (§20.2.4) :
 - CleantechAlps : écotecnologies, cleantech ;
 - Énergie-cluster : énergie, écotecnologies.

5.3.3.2 *Biologie systémique*

- Domaines de recherche clés (et chapitres associés de l’agenda de recherche) :
 - biologie systémique, sciences omiques (§6.3, §8) ;
 - génomique, transcriptomique et protéomique (§8.2.1-§8.2.4) ;
 - métabolomique (§8.2.5) ;
 - physiologie humaine (régulation endocrinienne) ; rythmes circadiens (§8.2.7) ;
 - biologie végétale : culture de plantes ; métabolisme végétal (§8.3.1.2) ;
 - nutriginomique (§8.3.2.2), alimentation fonctionnelle (§8.3.2.3) ;
 - microbiomique (§8.3.3) ;
 - connexes avec la notion d’habitat clos et durable et d’écologie industrielle : habitat autosuffisant (§10.3), habitat sain (§10.5) ;
 - connexes aux technologies de l’information et de la communication et à la microtechnique : bioinformatique (§9.2) ; bio-ingénierie (§8.3.3.4) ;
- Institutions clés de Suisse occidentale :
 - UNIL (FBM, CIG, SIB ; FSSP) (§5.2.1.1.a, §5.2.1.1.c) ;
 - CHUV (§5.2.1.2) ;
 - EPFL (SV, STI, SB) (§5.2.1.3.b, §5.2.1.3.c, §5.2.1.3.e) ;
 - UNIGE / HUG¹⁸⁷ (§5.2.1.5).
- Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions de Suisse occidentale :
 - Human Brain Project (§5.2.1.6.a) ;
 - SystemsX (§5.2.1.6.b) ;
 - Swiss Integrative Center for Human Health (§5.2.1.6.e).
- Clusters technologiques de Suisse occidentale (§20.2.3) :
 - les biotechnologies et la pharmacie ;
 - la nutrition et les produits de grande consommation ;
 - les technologies médicales et les hautes technologies liées à la santé ;
 - les micro- et nanotechnologies et ingénierie de précision.
- Clusters de promotion des technologies de Suisse occidentale (§20.2.4) :
 - BioAlps : biotechnologie, medtech ;
 - Medical Cluster : technologies médicales ;
 - Swiss Food Research : industrie agroalimentaire.

¹⁸⁷ Seule une revue partielle des groupes de recherches de ces institutions a été effectuée dans le cadre de cette étude.

5.3.3.3 Technologies de l'information et de la communication

- Domaines de recherche clés (et chapitres associés de l'agenda de recherche) :
 - sciences computationnelles : sciences informatiques et biologie computationnelle (§9.1) ;
 - technologies embarquées (§6.4.2, §6.4.3, §9.3): smart monitoring et senseurs de type MEMS (§9.3.1) ;
 - nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC) : informatique mobile et ubiquitaire (§6.4.1, §9.3.1) ;
 - sciences et technologies de l'interaction : interfaces Homme-Machine (§9.3.3) ;
 - télésanté, télémédecine (§9.4) ;
 - connexes avec la notion habitat clos et durable : habitat autonome (§10.4), habitat sain (§10.5), habitat intelligent (§10.6).
- Institutions clés de Suisse occidentale :
 - UNIL (HEC) (§5.2.1.1.d) ;
 - EPFL (STI, IC, SB) (§5.2.1.3.c, §5.2.1.3.d, §5.2.1.3.e) ;
 - CSEM (§5.2.1.4) ;
 - IDIAP (§5.2.1.5).
- Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions de Suisse occidentale :
 - Nano-Tera (§5.2.1.6.c) ;
 - Smart Living Lab (§5.2.1.6.d).
- Clusters technologiques de Suisse occidentale (§20.2.3) :
 - les technologies de l'information et de la communication ;
 - les micro- et nanotechnologies et ingénierie de précision.
- Clusters de promotion des technologies de Suisse occidentale (§20.2.4) :
 - Micronarc : micronanotechnologies, ingénierie de précision ;
 - AlpICT : technologie de l'information et de la communication ;
 - Cluster précision : industrie de précision, microtechnologies ;
 - Information Systems & IT Cluster (ISIS) : systèmes d'information, multimédia, applications et sécurité informatiques.

5.3.3.4 *Habitat clos et durable*

- Domaines de recherche clés (et chapitres associés de l’agenda de recherche) :
 - habitat clos et durable (§6.1.4, §10) : éco-habitat (§10.2) ; habitat autosuffisant (§10.3) ; habitat autonome (§10.4) ; habitat sain (§10.5) ; et habitat intelligent (§10.6).
- Institutions clés de Suisse occidentale :
 - UNIL (FBM, GSE, SSP) (§5.2.1.1.a, §5.2.1.1.b, §5.2.1.1.c) ;
 - EPFL (ENAC, STI, IC) (§5.2.1.3.a, §5.2.1.3.c, §5.2.1.3.d) ;
 - CSEM (§5.2.1.4) ;
 - EMPA / PSI¹⁸⁸ (§5.2.1.5).
- Projets de recherche et initiatives multipartenaires menés par des institutions de Suisse occidentale :
 - Smart Living Lab (§5.2.1.6.d) ;
 - Swiss Integrative Center for Human Health (§5.2.1.6.e).
- Clusters technologiques de Suisse occidentale (§20.2.3) :
 - l’énergie et l’environnement (y compris les technologies environnementales) ;
 - les micro- et nanotechnologies et ingénierie de précision ;
 - les technologies de l’information et de la communication.
- Clusters de promotion des technologies de Suisse occidentale (§20.2.4) :
 - CleantechAlps : écotecnologies, cleantech ;
 - Énergie-cluster : énergie, écotecnologies ;
 - Micronarc : micronanotechnologies, ingénierie de précision ;
 - Cluster précision : industrie de précision, microtecnologies ;
 - AlpICT : technologie de l’information et de la communication.

¹⁸⁸ Seule une revue partielle des groupes de recherches de ces institutions a été effectuée dans le cadre de cette étude.

5.4 Formulation d'un agenda de recherche pour le programme Oïkosmos

La dernière activité de la Partie II du rapport a consisté à formuler un agenda de recherche préliminaire pour le programme Oïkosmos.

§5.4 FORMULATION D'UN AGENDA DE RECHERCHE POUR LE PROGRAMME OÏKOSMOS

Tout d'abord, les domaines clés de la portée consolidée, liés à chacun des champs disciplinaires (écologie industrielle, biologie systémique, technologies de l'information et de la communication et habitat durable) ont servi de canevas à l'articulation de synergies de recherches terrestres et spatiales dans la perspective des ECA.

Dans la foulée, un approfondissement a permis l'identification et la compilation des thématiques et des sujets de recherches associés à chacune de ces synergies, ainsi que les éventuelles expériences, expérimentations, tests, procédures et protocoles potentiels.

Cet agenda de recherche, détaillé ci-après, cherche à démontrer de manière concrète la pertinence des synergies proposées dans la présente étude pour le développement d'un démonstrateur d'ECA performant.

Il cherche en particulier à favoriser les interactions entre des scientifiques, des ingénieurs et des techniciens provenant des communautés terrestres et du spatial, au sein d'un démonstrateur au sol dédié – le simulateur d'ECA (Partie III).

Cette agenda s'articule autour des synergies, domaines, thématiques et sujets de recherche liés :

- au champ disciplinaire de l'écologie industrielle (§7) ;
- au champ disciplinaire de la biologie systémique (§8) ;
- au champ disciplinaire des technologies de l'information et de la communication (§9) ;
- à la notion d'habitat clos et durable (§10).

6 Contexte terrestre

Ce chapitre consacré à l'exploration du contexte terrestre (voir méthodologie au §5.3.1) est découpé en quatre parties, dédiées à la description :

- des tendances lourdes renforçant la pertinence du programme Oïkosmos (§6.1) ;
- de l'essor du champ d'étude et d'action de l'écologie industrielle (§6.2) ;
- de l'essor du champ disciplinaire de la biologie systémique (§6.3) ;
- de l'essor du champ des technologies de l'information et de la communication (§6.4).

6.1 Les tendances lourdes renforçant la pertinence du programme Oïkosmos

Le présent rapport a permis l'identification de problématiques *a priori* spécifiquement terrestres qui semblent pouvoir être couplées de manière pertinente aux travaux « spatiaux » dans le cadre du programme de recherche Oïkosmos (voir objectifs du rapport au §3.1). Dans un premier temps, il a été nécessaire de faire un parallèle entre le contexte spatial, discuté précédemment aux §1 et §4, et le contexte « terrestre », en explorant quelques-unes des tendances lourdes en Europe en terme :

- d'évolution démographique : avec une population européenne vieillissante (§6.1.1) ;
- d'évolution épidémiologique : avec une population européenne affectée par des maladies chroniques, exposée à des pollutions environnementales, et présentant des comportements à risque (§6.1.2) ;
- d'amélioration de la performance environnementale par l'ensemble des acteurs de la société européenne, une progression qui s'avère indispensable dans un contexte d'augmentation continue de la pression sur les ressources (§6.1.3) ;
- de contraintes des habitats terrestres de demain de plus en plus similaires à celles des habitats clos (§6.1.4).

6.1.1 Évolution démographique : une population européenne vieillissante

La population européenne, et de manière générale la population occidentale, vieillit.

2012 a été proclamée l'Année européenne du vieillissement actif et de la solidarité intergénérationnelle. La génération des « baby-boomers » est à l'aube de la retraite. Elle est mieux formée, en meilleure santé, plus mobile et dispose d'une épargne plus conséquente que par le passé. L'allongement de la vie des Européens est bien entendu couplé à un désir de bénéficier d'une qualité de vie améliorée. Cependant,

si l'on considère l'évolution démographique¹⁸⁹, on constate que celle-ci est caractérisée :

- sur l'ensemble de la planète :
 - par une croissance de la population, avec plus de 7.3 milliards d'habitants en 2015¹⁹⁰ ;
 - par une urbanisation croissante, avec plus de 50% de la population résidant dans les villes¹⁹¹ ;
 - par une densification des habitations (augmentation du nombre d'habitants par m² d'habitat), en particulier en milieu urbain et dans les pays asiatiques.
- dans les pays occidentaux :
 - par une population stable, voire décroissante (si l'on excepte les phénomènes migratoires)¹⁹² ;
 - par le vieillissement en cours de la population, généralement couplé à une baisse de la natalité des générations ayant suivi le « baby-boom » juste après la fin de la Seconde Guerre mondiale¹⁹³.
- dans les pays émergents et ceux en voie de développement :
 - par une croissance de la population ;
 - par un vieillissement prévu, mais plus tardif de leurs citoyens.

6.1.2 Évolution épidémiologique : une population européenne affectée par des maladies chroniques, exposée à des pollutions environnementales, et présentant des comportements à risque

En parallèle, on assiste à une augmentation du nombre d'Européens touchés par des maladies chroniques telles que le diabète (qui touche 10% de la population, soit 60 millions de personnes, selon l'OMS¹⁹⁴), les maladies cardiovasculaires (comme l'infarctus du myocarde, hypertension) et neurodégénératives (comme la maladie d'Alzheimer et celle de Parkinson), ainsi que les maladies gastro-intestinales

¹⁸⁹ Voir par exemple le rapport 2012 du « Population Reference Bureau », disponible à l'adresse : www.prb.org

¹⁹⁰ D'après les estimations de *Worldmeters* : www.worldometers.info/world-population (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹¹ Voir le rapport « Population Facts No. 2014/2, August 2014 - A World of Cities » publié par la Division Population des Nations Unies: www.un.org/en/development/desa/population/publications/factsheets/index.shtml (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹² Voir les données statistiques sur l'évolution de la population d'Eurostat :

http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Population_and_population_change_statistics/fr (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹³ Voir les données statistiques sur la structure et le vieillissement de la population d'Eurostat : http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Population_structure_and_ageing/fr (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹⁴ Voir les données disponibles sur ce que l'OMS qualifie d'épidémie de diabète en Europe :

www.euro.who.int/fr/what-we-do/health-topics/noncommunicable-diseases/diabetes/news/news/2011/11/diabetes-epidemic-in-europe (dernière consultation le 13.06.2015)

(troubles du foie, calculs biliaires, etc.). Ces maladies représentent aujourd'hui l'essentiel du marché pharmaceutique (70% en Europe et 65% aux États-Unis selon PricewaterhouseCoopers¹⁹⁵) et participent significativement à l'explosion des coûts de la santé dans la plupart des pays européens¹⁹⁶, en raison notamment des progrès technologiques, de la durée des séjours hospitaliers plus longue, de l'exigence croissante des patients, etc.

Si dans la plupart des pays, et en particulier dans les pays riches, la tendance a été depuis près de deux siècles à une augmentation globale et régulière de l'espérance de vie, on constate depuis peu une stabilisation, voire une baisse dans certains pays comme c'est le cas aux États-Unis, mais aussi en Europe de l'est (Miniño et al. 2011). Les causes de cette baisse semblent être à la fois environnementales et comportementales, avec une population européenne qui est d'une part exposée à des pollutions environnementales (détérioration de la qualité de l'air, présence de micropolluants dans les eaux ou dans certains aliments, etc.), et qui, d'autre part, présente des comportements à risque comme la consommation excessive d'alcool, le tabagisme, une mauvaise hygiène alimentaire causant de l'obésité ou encore un manque d'activité et une sédentarité au quotidien.

6.1.3 Amélioration de la performance environnementale : une progression indispensable dans un contexte d'augmentation continue de la pression sur les ressources

Menaces de pénurie de ressources, écosystèmes naturels en péril, gestion des déchets urbains chaotique, micropolluants omniprésents dans nos aliments et dans nos eaux de boissons... (Chèvre & Erkman 2011), il ne se passe pas un jour sans que les médias n'abordent l'urgence d'une gestion durable des ressources matérielles et énergétiques, que ce soit à l'échelle locale, régionale, nationale et internationale.

Ces circonstances ont fait fleurir ces dernières années des initiatives telles que le Millennium Ecosystem Assessment (MA)¹⁹⁷, qui a cherché dès 2001 à évaluer la durabilité des écosystèmes terrestres et la soutenabilité des services qu'ils fournissent. Dans son article publié dans la revue *Science*, Stokstad (2005) identifie les points sensibles qui découlent de la manière avec laquelle les écosystèmes sont gérés aujourd'hui, et met l'accent sur des problématiques telle que l'absence d'informations de base nécessaires à la l'établissement de prédictions précises sur l'état futur des écosystèmes. Le MA a traduit les

¹⁹⁵ Des données détaillées sont disponible sur le portail « Emerging trends in healthcare » de PwC : www.pwc.com/gx/en/healthcare/emerging-trends-pwc-healthcare/index.jhtml (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹⁶ Voir le rapport « Projecting future health care expenditure at European level: drivers, methodology and main results », du *Directorate-General for Economic and Financial Affairs* de la Commission Européenne http://ec.europa.eu/economy_finance/publications/economic_paper/2010/pdf/ecp417_en.pdf (dernière consultation le 13.06.2015)

¹⁹⁷ Les rapports du Millenium Ecosystem Assessment sont disponibles en ligne: <http://millenniumassessment.org/en/index.html> (dernière consultation le 01.06.2014)

conséquences des changements des écosystèmes en paramètres significatifs d'un point de vue économique. Il s'est penché sur la manière avec laquelle ces changements influencent le bien-être de l'homme, afin de fournir des informations pratiques aux décideurs, de sorte qu'ils puissent prendre des décisions appropriées.

En 2015, plus de vingt ans après la conférence de Rio, le contexte géopolitique, l'évolution de l'économie et des marchés financiers européens a certes quelque peu mis en retrait les priorités d'intégration des thématiques liées au développement durable dans les agendas politiques. Reste que la nécessité de l'amélioration de la performance environnementale des activités anthropiques (et donc la réduction de son impact sur l'environnement) est à présent relativement bien ancrée dans les esprits des décideurs du continent, notamment au sein des collectivités et des grandes entreprises, de même qu'au sein des milieux académiques. Le management durable des activités des organisations publiques et privées se poursuit, s'améliore et se diversifie. Le citoyen européen lambda est lui aussi régulièrement incité à adopter un comportement « durable ». Il participe – parfois de manière très active – à l'effort collectif de mise en œuvre des « bonnes pratiques » de durabilité, comme par exemple au travers d'une utilisation efficiente et rationnelle des ressources, par l'usage de transports publics, ou encore par ses choix de consommation ayant un impact réduit sur l'environnement. Toutefois, si la prise de conscience générale est manifeste pour une partie croissante de la population européenne, les démarches environnementales réellement planifiées et surtout mises en œuvre peinent à se généraliser à l'ensemble des acteurs de l'« écosystème industriel » (voir §6.2.1). Ainsi, ces fameuses bonnes pratiques de durabilité ne sont pas systématiquement intégrées (ou du moins pas suffisamment intégrées) dans les activités, les produits et les services de la société européenne, mais aussi dans les comportements et choix de consommation de ses citoyens.

En parallèle, le modèle économique dominant met les entreprises en compétition de manière toujours plus intense, sur des marchés de plus en plus ouverts et globalisés. Dans ce contexte, les écotecnologies constituent avant tout aujourd'hui une nouvelle opportunité de croissance.

À vrai dire, les écotecnologies (ou cleantech ou greentech) n'incarnent pas des concepts scientifiquement rigoureux, et ne se traduisent pas par des résultats forcément pertinents du point de vue environnemental. Autrement dit, elles représentent d'abord des segments de marché potentiel, où l'on trouve, pêle-mêle, les technologies modernisées de traitement de la pollution, une grosse part d'énergies renouvelables, et diverses techniques d'optimisation de la consommation d'énergie et de ressources. Toutefois, bien que le management de la performance environnementale ne soit plus uniquement axé sur la réduction des coûts opérationnels et la maîtrise des risques environnementaux, des changements restent nécessaires au découplage réel de la création de valeur économique de la charge environnementale, afin de réduire la pression sur les ressources, les impacts par habitant, etc. Les systèmes de recyclage actuels, aussi bien au niveau du traitement des déchets que de l'épuration des eaux, sont encore de (trop) gros consommateurs de flux de matières et d'énergie. De plus, ils opèrent

avec des rendements relativement faibles : au taux de recyclage actuel, ces systèmes présentent des limites pour pérenniser la disponibilité des ressources, car on observe en parallèle une augmentation constante de la consommation de nombre d'entre elles. À titre d'illustration, il règne toujours une certaine confusion autour du taux de recyclage *apparent* et du taux de recyclage *réel*. Ce dernier dépend de la consommation de ressources de matières premières et de leur durée de séjour dans l'économie, donc du volume effectif de matières disponibles en vue d'un tel recyclage (Grosse 2010).

L'« économie circulaire » (Ellen MacArthur Foundation, 2013), qui vise à maximiser la réduction, la réutilisation, et le recyclage afin de moins consommer de ressources et rejeter de déchets par unité de produit, n'est, semble-t-il, pas suffisante en soi. Il faut en parallèle pouvoir découpler la croissance économique de la consommation totale (absolue) de matières premières. En effet, si le recyclage est une solution nécessaire, elle n'est pas suffisante à elle seule pour régler le problème de la pression sur les ressources. Par exemple, pour un taux de recyclage de 80% d'un matériau donné - que l'on peut considérer comme élevé à l'heure actuelle -, avec une croissance annuelle de 2% de la consommation d'une ressource naturelle et un temps de séjour moyen de 7 ans dans l'économie, soixante ans suffisent pour que la consommation avec recyclage dépasse l'unité de consommation de départ sans recyclage. « En fait, si la consommation croît durablement selon un taux constant, la courbe de consommation dans le temps de la ressource naturelle est identique que l'on recycle ou non. La seule différence est qu'elle se décale dans le temps si le taux de recyclage est plus élevé, elle retrouve exactement les mêmes valeurs que si l'on n'avait pas recyclé [...] » (Grosse 2010).

Ceci démontre bien la nécessité d'améliorer la performance environnementale des systèmes de recyclages actuels, notamment par l'emploi croissant et si possible la généralisation des écotecnologies, ainsi que leur optimisation, pour laquelle une forte marge de progression semble exister afin de les rendre réellement efficaces. La mise en œuvre à grande échelle des démarches environnementales doit aussi se fonder sur l'incitation à des comportements durables (aussi bien de la part des entreprises que des organisations publiques et des citoyens européens), misant sur le bon sens ou parfois déployés via des instruments volontaires. De telles stratégies semblent pertinentes à l'heure où les approches contraignantes (taxes environnementales) ne cessent de croître sans toutefois atteindre les objectifs environnementaux qu'elles ambitionnent d'atteindre lors de leur entrée en vigueur.

6.1.4 Les contraintes des habitats terrestres de demain de plus en plus similaires à celles des habitats clos

De manière générale, les habitats terrestres et leurs habitants sont aujourd'hui confrontés – et risquent à l'avenir de l'être toujours plus – à un renforcement de contraintes, certes moins extrêmes que leurs équivalents spatiaux, mais présentant des similarités grandissantes avec eux, par exemple pour les critères liés :

- *au confinement* : avec des milieux urbains présentant des enjeux liés à la faible taille et de réduction de volume de l'habitat, dans un contexte de densification de celui-ci (§6.1.1) ;
- *à l'isolement et à l'autonomie* : en particulier pour des personnes âgées, convalescentes ou souffrant de maladies chroniques, pouvant présenter des difficultés d'accès aux soins pour des habitants vivant hors des centres urbains (voir §9.4 sur la télésanté) ;
- *aux conditions environnementales auxquelles sont exposés les habitants* : dans un contexte de pollutions croissantes subies par ses écosystèmes, avec des enjeux liés à la qualité de l'air, aux changements climatiques, etc. (voir par exemple le 10.5 sur l'habitat sain) ;
- *aux ressources matérielles et énergétiques nécessaires à l'habitat* : avec des pressions croissantes sur les ressources provoquant des manques de disponibilité d'un nombre toujours plus élevé d'entre elles ou encore des enjeux d'efficacité énergétique, tout au long du cycle de vie, en particulier pour :
 - l'habitat (bâtiment) : lors des phases de construction (matériaux de construction), d'exploitation (approvisionnement énergétique) et de rénovations ;
 - les dispositifs et les équipements de l'habitat : lors des phases de fabrication (usage d'écomatériaux), d'installation, d'exploitation (efficacité énergétique) et à la prise en charge en fin de vie (durabilité, recyclabilité, potentiel de valorisation énergétique et réutilisation de composants, etc.), dont les fonctionnalités assurent la sécurité et le confort des habitants, garantissent le stockage des réserves (en eau, en nourriture, etc.) ou offrent les moyens de communication adéquats.
- *à l'approvisionnement en nutriments nécessaires à la (sur)vie des habitants* : enjeux liés à la qualité de l'eau et des aliments (présence d'agents pathogènes, bioaccumulation de contaminants et de micropolluants), à la disponibilité et efficacité des ressources pour la production agricole, à la qualité des sols (pertes dissipatives d'azote, de phosphore). À titre d'exemple, entre 1960 et 2000, la production agricole mondiale a vu les demandes en azote, en phosphore et en eau augmenter respectivement de 600%, 300% et 80 % (Tilman et al. 2002). En parallèle, les rendements de cultures comme le maïs ont progressé de près de 40%, mais l'augmentation d'efficacité semble avoir atteint un plateau¹⁹⁸ ;
- à la hausse des exigences de conformité pour la législation environnementale et les normes techniques, et une hausse des coûts de traitements : en particulier dans les pays européens (y compris en Suisse). Par exemple, les coûts de dépollution et les taxes de protection atteignent dans certains pays comme la France en moyenne 60% de la facture d'eau (Agence de l'eau Seine-Normandie et al. 2002).

¹⁹⁸ Voir les données de la Banque mondiale :

<http://donnees.banquemondiale.org/indicateur/AG.YLD.CREL.KG?page=6> (dernièreconsultation le 13.06.2015)

En ayant à l'esprit les fortes contraintes subies par la planète Terre, la présente étude table sur une poursuite de l'accroissement des similarités des contraintes terrestres avec celles du spatial. Ainsi, elles se rapprocheront, dans une certaine mesure, de celles du spatial, en particulier en termes de rareté des ressources et de dissipation des émissions des déchets et co-produits (CO₂, micropolluants, composés azotés ou phosphorés comme les engrais, etc.) issus des activités de l'écosystème industriel (voir §6.2.1). En conséquence, lorsque l'homme est intégré à un ECA dans un habitat clos, il est possible de le considérer comme un habitat soumis à de fortes contraintes, puisqu'il combine justement l'ensemble de celles listées ci-dessus.

Dans la perspective de l'écologie industrielle (§6.2), il s'agit précisément de bien intégrer la « perception des limites », aussi bien sur Terre que sur Mars. Sur la planète rouge et plus généralement dans les habitats spatiaux, il n'est en effet pas possible de « tricher » avec les réservoirs et les stocks – et ce de manière bien plus flagrante que sur notre planète bleue –, ce qui rend indispensable le développement de système de recyclage hautement efficient. Ainsi, il existe une *analogie* entre les conditions martiennes « draconiennes » et celles auxquelles la Terre pourrait faire face dans un futur proche, en plus de certaines conditions « drastiques » déjà observables aujourd'hui même (micropolluants ubiquitaires, pressions sur les terres rares, etc.).

La Terre, ce « vaisseau terrestre » si cher à Buckminster Fuller (« spaceship Earth », littéralement vaisseau spatial Terre) (Fuller 1969) peut être envisagé comme une « capsule », certes immense, mais qui se rétrécit de manière continue, compte tenu de la baisse relative et absolue du niveau de ressources disponibles. En ce sens, un simulateur d'ECA tel que FIPES (§4.2.2.2) se profile comme une installation pilote permettant de se préparer et de s'adapter à un futur plus contraignant, avec des conditions toujours plus similaires à celles rencontrées dans les systèmes spatiaux. C'est d'ailleurs déjà le cas aujourd'hui pour certains sites terrestres en conditions extrêmes, tels que les bases polaires en Arctique et en Antarctique, les sous-marins, les sites frappés par des catastrophes naturelles ou par des conflits. L'étude des habitats clos présente également un intérêt notable pour l'optimisation de l'utilisation des ressources d'habitats isolés (cabanes de montagnes), d'habitats flottants ou de certaines îles.

Dans ce contexte, l'étude approfondie des ECA et des habitats clos dans le cadre du programme de recherche Oïkosmos semble d'autant plus pertinente pour les chercheurs terrestres.

Les prochains chapitres décrivent l'essor des champs de recherche pertinents dans le cadre du programme Oïkosmos (§6.2 à §6.4). Nous verrons ensuite quelles synergies de recherches terrestres et spatiales pourraient être mises en œuvre dans le contexte d'un simulateur d'ECA et des habitats clos (§5 à §11).

6.2 L'essor du champ d'étude et d'action de l'écologie industrielle

6.2.1 Comprendre l'écosystème industriel

Popularisée par Frosh et Gallopoulos à la fin des années huitante (Frosch & Gallopoulos 1989b)¹⁹⁹, l'écologie industrielle développe des méthodologies et des solutions innovantes, cherchant à répondre aux enjeux environnementaux qui nécessitent d'améliorer significativement les performances environnementales de nos activités.

L'écologie industrielle n'est pas une discipline, mais plutôt un nouveau champ disciplinaire ou domaine de recherche au carrefour de plusieurs disciplines (Erkman 1997). L'émergence du concept est basée sur une analogie (et non pas la correspondance exacte) (Wells 2005) entre le fonctionnement des écosystèmes naturels et celui de l'écosystème industriel, qui englobe l'ensemble des activités anthropiques d'extraction, de production et de consommation. L'écologie industrielle considère le système industriel comme un cas particulier d'écosystème, au sein de la Biosphère, qui peut être décrit par une description particulière de flux de matières, d'énergie et d'informations (Erkman 2001). En outre, le système industriel repose sur des ressources et des services fournis par la Biosphère. Le terme « industriel » fait référence à l'ensemble des activités humaines, de l'agriculture aux transports, en passant par les services, le commerce et le tourisme, et pas seulement aux industries. Elle a été appelée par certains la « science de la durabilité » (Ehrenfeld 2004). L'écologie industrielle se réfère en priorité à l'écologie scientifique, aux sciences naturelles et à celles de l'ingénieur (Erkman 2004). En s'appuyant sur l'écologie scientifique et son cadre conceptuel large (l'évolution et le fonctionnement des écosystèmes naturels), mais néanmoins rigoureux, l'objectif de l'écologie industrielle est l'étude de l'évolution de l'écosystème industriel dans son ensemble et sur le long terme (Graedel 1996).

L'écologie industrielle peut être envisagée comme une approche opérationnelle du développement durable, offrant de nouvelles métriques pour décrire les fondements physiques de l'économie et les comptabiliser. La perspective de l'écologie industrielle correspond à un changement de paradigme, puisque la Biosphère est utilisée comme un modèle dont on copie les cycles et les écosystèmes, et non comme un simple « fournisseur » de ressources ou une limite biophysique.

¹⁹⁹ Ses deux auteurs travaillent à l'époque chez General Motors : Robert Frosch – par ailleurs ancien administrateur de la NASA de 1977 à 1981 – en tant que vice-président de la recherche, et Nicholas Gallopoulos, comme responsable de la recherche sur les moteurs. Dans la version traduite de leur article parue dans *Pour la science* (1989a), ils développent l'idée qu'il devrait être possible de mettre au point des méthodes de production industrielle dont l'impact sur l'environnement serait considérablement réduit. Cette hypothèse les conduit à introduire la notion d'écosystème industriel :

« Dans le système industriel traditionnel, chaque opération de transformation, indépendamment des autres, consomme des matières premières, fournit des produits que l'on vend et des déchets que l'on stocke ; on doit remplacer cette méthode simpliste par un modèle plus intégré : un écosystème industriel. [...] Un écosystème industriel pourrait fonctionner comme un écosystème biologique : les végétaux synthétisent des substances qui alimentent les animaux herbivores, lesquels sont mangés par les animaux carnivores, dont les déchets et les cadavres servent de nourriture à d'autres organismes. On ne parviendra naturellement jamais à établir un écosystème industriel parfait, mais les industriels et les consommateurs devront changer leurs habitudes s'ils veulent conserver ou améliorer leur niveau de vie, sans souffrir de la dégradation de l'environnement. »

L'écologie industrielle offre donc les moyens d'appréhender le métabolisme de l'écosystème industriel, c'est-à-dire de mesurer, quantifier et analyser les flux et stocks de matières et d'énergie, en plus des flux financiers. Pour ce faire, ce « métabolisme industriel » (ou analyse de flux de matières) s'inspire du rapport du fonctionnement des écosystèmes naturels (Ayres 1994) et s'intéresse à l'étude de l'*ensemble* des composants biophysiques du système industriel liés aux activités humaines, par opposition aux approches usuelles, qui considèrent l'économie essentiellement en termes d'unités de valeur monétaire, immatérielles. Cette démarche, essentiellement analytique et descriptive, vise à comprendre la dynamique des flux et des stocks de matières et d'énergie liés aux activités humaines, et ce, de l'extraction à la production des ressources jusqu'à leur retour dans les cycles biogéochimiques. Les méthodologies utilisées quantifient, mesurent et évaluent la circulation, la distribution ou encore l'accumulation de ressources, de produits et de déchets, à une échelle hiérarchique pertinente : un pays, un territoire, un parc éco-industriel ou même un habitat clos doté d'un ECA.

6.2.2 Améliorer la performance environnementale de l'écosystème industriel

Dans le cadre de la mise en œuvre de l'écologie industrielle, il s'avère pertinent d'appliquer des approches et stratégies comme :

- l'*approche cycle de vie*, qui « vise principalement à réduire les impacts environnementaux des produits et services et à améliorer leurs performances socio-économiques pendant toute la durée de leur cycle de vie, depuis l'extraction de matières premières et la production d'énergie jusqu'à la mise au rebut ou à la récupération en fin de vie, en passant par la fabrication et l'utilisation » (ISO 26000 : 2010, p. 51, voir également §7.2.5) ;
- les *synergies industrielles* : une des stratégies opérationnelles de l'écologie industrielle se base au départ sur la création de « chaînes alimentaires » ou « réseaux trophiques », à l'image de ceux de la Biosphère. Ainsi, les symbioses industrielles « engagent des industries traditionnellement séparées dans une recherche collective de compétitivité incluant les échanges physiques de matières, d'énergie et d'eau et/ou de co-produits. Les éléments clés de la symbiose sont la collaboration et la proximité géographique » (Chertow 2000). Pour être reconnue comme telle et pour se distinguer d'autres types d'échanges entre acteurs économiques, une telle synergie industrielle doit impliquer au moins trois acteurs différents qui s'échangent au moins deux ressources. Les trois entités considérées ne doivent pas préalablement être engagées dans des activités de recyclage. Outre les échanges permettant de valoriser le déchet d'une entreprise en une ressource pour une deuxième, il peut s'agir également de mutualisation d'approvisionnement ou de traitements, respectivement pour de flux entrants ou sortants basés sur le partage de services, d'équipements ou d'infrastructures. Une telle implémentation nécessite un dialogue souvent relativement étroit d'un nombre adéquat de parties prenantes,

dans une approche à la fois collaborative, coopérative et collective. Aujourd'hui, de nombreux projets d'éco-innovation en zone industrielle ou urbaine sont déployés à l'internationale (Massard et al. 2014) ;

- la *production propre* et l'*éco-efficience* : des stratégies « destinées à répondre aux besoins de l'Homme en utilisant les ressources de manière plus efficace et en engendrant moins de pollution et de déchets. Un point important consiste à apporter des améliorations à la source plutôt qu'à la fin d'un processus ou d'une activité. Une approche de production plus propre, plus sûre et axée sur l'éco-efficience englobe les éléments suivants : amélioration des pratiques de maintenance; introduction de nouvelles technologies ou de nouveaux processus; réduction de la consommation de matières premières et d'énergie; utilisation d'énergies renouvelables; rationalisation de l'utilisation de l'eau; élimination ou gestion en toute sécurité des matières et déchets toxiques et dangereux; et amélioration de la conception des produits et services » (ISO 26000 : 2010, p. 51).

Les méthodologies et outils de l'écologie industrielle utiles à la mise en œuvre concrète des approches et stratégies ci-dessus aident ainsi à diagnostiquer les possibilités de minimisation des impacts environnementaux et permettent d'identifier des opportunités d'optimisation de la performance environnementale (§6.1.3). Celles-ci doivent bien entendu d'abord faire l'objet des études de faisabilité nécessaires (techniques, réglementaires, géographiques, économiques, etc.). Les étapes suivantes visent ensuite à effectuer un arbitrage de choix, afin de sélectionner et mettre en œuvre les stratégies d'action les plus pertinentes, c'est-à-dire celles pouvant amener le meilleur retour sur investissement global, en termes d'amélioration de la performance environnementale globale, de réduction des coûts opérationnels, de croissance du chiffre d'affaires (dans le cas d'une entreprise) et/ou de pérennisation de l'activité de l'organisation.

En d'autres termes, l'écologie industrielle propose une palette d'outils de diagnostic et d'aide à la décision offrant aux entreprises et à certaines organisations publiques la possibilité d'élaborer des stratégies environnementales adéquates (ce qui peut se traduire par une compétitivité accrue), voire même de détecter et concrétiser des opportunités de nouveaux marchés.

Elle développe et intègre des instruments permettant de mesurer les performances concrètes provenant de l'analyse des flux de matières et d'énergie d'activités économiques, ainsi que d'évaluer les impacts associés de ces dernières sur les écosystèmes et la santé humaine. Surtout, l'écologie industrielle promeut des stratégies opérationnelles, capables de relier ce cadre conceptuel à des solutions économiquement viables. De surcroît, elle propose aux acteurs de l'économie des approches collaboratives, qui viennent s'ajouter aux règles habituelles de la compétition.

6.2.3 Catalyser l'écotransition du système industriel

Enfin, l'originalité de l'écologie industrielle réside dans son approche globale de l'évolution technologique. Il ne suffit pas que les acteurs de l'écosystème industriel, chacun à titre individuel, adoptent des techniques optimales, aussi propres soient-elles : l'infrastructure du système industriel dans son intégralité doit également évoluer pour devenir viable avec le fonctionnement durable de la Biosphère (Erkman 2004). Autrement dit, les choix stratégiques ne portent pas simplement sur des technologies considérées isolément, mais ils interviennent à l'échelle des systèmes technologiques et des grandes infrastructures (réseau de traitement des eaux usées, modes de transports, réseaux de distribution d'énergie, urbanisme, réseau routier, aménagement du territoire). D'une manière générale, l'écologie industrielle cherche donc à offrir une vision d'une économie compatible avec le fonctionnement des écosystèmes naturels, en esquisant des solutions à une échelle systémique (voir §7.1.1). Une telle « écotransition » représente un des principaux challenges de l'écologie industrielle. Elle consiste à réorganiser en profondeur l'ensemble du système économique, afin de favoriser un usage optimal de la totalité des ressources, et non pas seulement la valorisation des déchets. La dynamique technologique, c'est-à-dire l'évolution sur le long terme de grappes de technologies-clés, constitue un facteur crucial (mais pas exclusif) pour accélérer cette « transition écologique » du système industriel. À cette fin, de nombreuses innovations sociales, économiques, politiques et organisationnelles sont également nécessaires, pas seulement des innovations technologiques au sens étroit (Erkman 2004).

En conclusion, l'écologie industrielle s'intéresse à l'évolution du système industriel dans sa globalité (à l'échelle régionale, voire planétaire) et à long terme, en préconisant l'utilisation des écosystèmes naturels comme modèle pour l'ensemble des activités anthropiques. L'idée sous-jacente est de catalyser une coévolution des systèmes industriels, socioéconomiques et naturels. Ainsi, les acteurs de l'économie deviennent des instruments cruciaux pour limiter les impacts sur l'environnement, au lieu d'être simplement la source de désagréments. Le recyclage des déchets n'est plus une fin en soi et les problèmes d'environnement ne constituent qu'un aspect, parmi d'autres, de l'écologie industrielle, qui œuvre pour l'avènement d'un système industriel plus élégant, c'est-à-dire capable de générer plus de richesses et de bien-être avec moins d'impacts sur la Biosphère (Erkman 2004).

Les domaines, thématiques et sujets de recherche liés au champ de recherche de l'écologie industrielle, qui pourraient être investigués dans le cadre d'un programme Oïkosmos, sont présentés au §5.

6.3 L'essor du champ disciplinaire de la biologie systémique

6.3.1 Une expansion possible grâce à une combinaison gagnante de hautes technologies

Parmi les évolutions notables que les domaines de la biologie cellulaire ont connues ces dernières décennies, on retiendra le développement des techniques du génie génétique (enzyme de restriction, ADN recombinant, premiers organismes génétiquement modifiés, etc.), qui ont permis dès les années septante à huitante de manipuler des composants biologiques à l'échelle « subcellulaire » et moléculaire. Dans les années nonante, la révolution génomique a généralisé des méthodologies comme celles des réactions en chaîne par polymérase (ou « polymerase chain reaction » - PCR, en anglais). Il est devenu alors possible d'amplifier exponentiellement in vitro le contenu génique d'échantillons biologiques (cellulaires, viraux, etc.). La réaction passe par trois étapes : dénaturation du double brin d'ADN à amplifier – hybridation d'amorces (oligonucléotides) aux extrémités des brins – élongation des brins par les polymérases qui synthétisent les brins complémentaires à partir de nucléotides libres présents dans le milieu réactionnel. Une PCR répète généralement plusieurs dizaines de cycles afin d'obtenir jusqu'à plusieurs milliards de copies d'une séquence spécifique d'ADN. Ceci a par exemple drastiquement accéléré l'identification fonctionnelle des génomes d'organisme. Corollairement, le rôle des éléments de la machinerie cellulaire a été mieux appréhendé et compris.

Au début des années 2000, le génome humain a été séquencé entièrement par le « Human Genome Project » (HGP) qui a déterminé la séquence des 3.2 milliards de paires de base de l'ADN humain, composés de 23'000 gènes (Lander et al. 2001; Human Genome Sequencing Consortium 2004). Le tout pour un coût de près de trois milliards de francs suisses, qui ont servi au financement des travaux d'un consortium international de vingt laboratoires sur une période de treize ans.

Depuis, les récents progrès des biotechnologies, couplés à ceux des disciplines de l'ingénierie de précision, des microtechnologies et dans une certaine mesure des nanotechnologies, ont permis une augmentation exponentielle de la performance des équipements de technologies biomédicales (« medtechs ») et les hautes technologies liées à la santé, ainsi que la réduction drastique des coûts du séquençage. Le travail de la multitude de séquenceurs du HGP peut être réalisé aujourd'hui par un seul séquenceur dans un laboratoire après quelques mois pour une somme de quelques milliers de francs, grâce à des robots de pipetage et des machines PCR de dernière génération. Concrètement, les coûts de séquençage ont ainsi diminué d'un facteur mille et la rapidité a quant à elle été décuplée. Ces progrès technologiques ont permis le déploiement d'une nouvelle génération d'outils de manipulation des macromolécules. Dans le cas des acides nucléiques, ces appareils rendent dorénavant possibles la réalisation de tests rapides et bon marché sur tout le génome, alors qu'auparavant on ne faisait que des analyses génomiques très ciblées, gène par gène. À terme, certains prévoient même qu'il « sera certainement possible séquencer un génome en quelques dizaines de minutes pour un coût inférieur à

cent dollars », via des séquenceurs de troisième génération capable de lire l'ADN à la vitesse à laquelle opèrent les enzymes de réplication (Wahli & Constantin 2011). L'intérêt est immense pour les médecins, mais aussi pour les chercheurs et les compagnies actives dans les sciences de la vie, puisque cette combinaison gagnante de hautes technologies pourrait à l'avenir améliorer significativement la qualité et la rapidité de certains diagnostics et pronostics, mais aussi accélérer la recherche expérimentale en la matière. D'un autre côté, « [l]a capacité des séquenceurs (appareils automatiques qui fournissent les différentes séquences de l'ADN) augmente plus rapidement que celle des processeurs », comme le constate le Prof. Ron Appel directeur de l'Institut Suisse de Bioinformatique²⁰⁰. La loi de Moore, selon laquelle la puissance des ordinateurs double tous les 18 mois, est donc surpassée par « l'explosion des données issues des laboratoires biomédicaux, qui sont en outre de plus en plus nombreux à travailler sur le génome »²⁰¹.

En parallèle, l'ère « post-génomique » a été proposée à la fin du siècle dernier (Gershon 1997) fait précisément référence aux trajectoires technologiques permettant de poursuivre l'exploration des organismes vivants au-delà de projet de séquençage de leur génome, à l'image du HGP et des multiples autres qui ont suivis ces quinze dernières années. Les chercheurs en biologie moléculaire se sont rendus compte, en disséquant la cellule en ses différents composants micro- et macromoléculaires, de la nécessité de faire appel à des sciences fondamentales pour compléter les analyses biologiques. On assiste alors à présent à une transition vers les sciences « omiques », grâce à l'apport combiné de la physique, de la chimie et des mathématiques, mais aussi de l'informatique. Ensemble, elles permettent d'envisager d'élucider de nouveaux aspects du génome humain et de mieux appréhender la complexité du vivant.

Mais qu'entend-on exactement par sciences omiques, cette nouvelle appellation à la mode en biologie moléculaire ? « Omique » se réfère ici à tous les domaines de recherches finissant par « -omique » et précise que l'on tient compte de tous les éléments étudiés. Génomique, signifie par exemple « à propos de tous les gènes ». Ce domaine fait ainsi référence à la « biologie systémique » (ou biologie des systèmes), un champ de recherche académique qui vise à intégrer différents niveaux d'informations biologiques, afin d'améliorer notre compréhension du fonctionnement de systèmes biologiques.

Selon le Prof. Dr. Ralph Eichler, Président du Conseil de surveillance de SystemsX.ch (voir §5.2.1.6.b) et ancien président de l'EPF de Zurich : « La biologie systémique est considérée comme la prochaine grande étape de la recherche biologique après le déchiffrement du patrimoine génétique humain. Elle devrait permettre aux scientifiques non seulement d'épeler, comme aujourd'hui, la langue de la vie, mais aussi d'apprendre à la lire et à la comprendre – le défi est de taille, mais aussi riche en perspectives. »²⁰².

²⁰⁰ Lire l'entretien d'Elisabeth Gordon avec Ron Appel dans l'article, « La bioinformatique: un outil indispensable aux biologistes », paru dans la revue « Allez Savoir ! » du 23.01.2014 :

<http://www3.unil.ch/wpmu/allezsavoir/la-bioinformatique-un-outil-indispensable-aux-biologistes/>

²⁰¹ ibid.

²⁰² Voir le site de SystemsX.ch : <http://systemsx.ch/fr/systemsxch/la-biologie-des-systemes/index.html> (dernière consultation

En d'autres termes, les projets d'envergure comme le HGP ont permis aux scientifiques d'épeler le génome humain, sans pour autant permettre la compréhension du grand livre de la vie. Cette tentative de la biologie systémique d'apprendre le « langage du vivant », sous toutes ses formes, consiste en plus de connaître son alphabet, à en comprendre les mots (le rôle d'un gène X ou la fonction d'une protéine Y) et de pouvoir en déduire la signification de phrases ou paragraphes (correspondant aux cascades enzymatiques) qui forment au final le grand ouvrage composé de la somme des voies métaboliques d'un organisme donné.

On peut considérer le champ disciplinaire de la biologie systémique comme une nouvelle approche interdisciplinaire qui souhaite analyser des ensembles d'éléments en interaction les uns avec les autres, c'est-à-dire au niveau des systèmes de molécules (ADN, ARN, protéines, complexes moléculaires, édifices supramoléculaires, petites molécules, etc.). Les investigations portent sur différentes échelles des biosystèmes d'un organisme donné, aussi bien au niveau des organelles, des cellules, des tissus, des organes et des organismes biologiques qu'à celui de réseaux de molécules associés (gènes, protéines, métabolites, etc.) (Roux 2007). Il s'agit ensuite d'étudier simultanément ces systèmes d'éléments en utilisant des techniques de criblage à haut débit (« high-throughput screening » en anglais), afin de quantifier les variations observées dans le génome, le transcriptome, le protéome ou le métabolome (termes définis ci-après) d'un organisme, en réponse à une perturbation donnée (Roux 2007).

6.3.2 La transcriptomique et la protéomique permettent de suivre des systèmes de molécules qui varient dans le temps

Parmi les principaux domaines de productions de données à haut débit, on peut citer outre la génomique (science des gènes), la transcriptomique (celle des transcrits d'ARN) et la protéomique (celle des protéines). Elles présentent de nombreux points communs, puisque toutes trois étudient le fonctionnement des voies moléculaires d'un organisme dans son ensemble et emploient des technologies et des techniques relativement proches (identification, amplification, expression, etc.). Toutefois, il est important de souligner que le contenu du génome est relativement fixe et qu'il évolue peu dans une cellule, à part en cas de mutations génétiques²⁰³ et de modifications épigénétiques et reste spécifique à

le 10.01.2015).

²⁰³ Les mutations génétiques peuvent influencer, voire stopper l'expression de gènes en protéines, et modifier la forme et la fonction d'enzymes, entraînant des effets variés sur les organismes. Une inhibition de l'activité de l'hémoglobine entraîne par exemple une baisse de son taux de capture de l'oxygène sanguin. À l'échelle de l'organisme, ceci peut amener à des malformations ou à des pathologies chroniques comme des formes d'anémies dans le cas de l'hémoglobine. Mais, elles peuvent aussi causer des maladies cardiovasculaires, induire l'obésité, ou encore provoquer du diabète.

Les pertes d'informations génétiques interviennent à différentes échelles, allant de micromodifications du génome (suppression d'une ou plusieurs bases dans l'ADN jusqu'à celle de segments entiers de chromosomes. De plus, le simple ajout de matériel génétique au milieu d'un segment codant de l'ADN (qu'il s'agisse d'une seule ou de plusieurs milliers de paires de bases) peut suffire à empêcher la transcription de l'ADN en ARN messager (ARNm), et donc également la subséquente synthèse de la protéine codée par le gène en question.

un organisme donné. Les plus de 10'000 milliards de cellules du corps humain (Alberts et al. 2002) contiennent ainsi quasi exactement la même séquence génomique, exception faite des mutations accumulées au long de la vie par certaines d'entre elles. Le transcriptome et le protéome varient quant à eux en permanence en fonction du temps, des conditions environnementales, du stade de développement, etc. La métamorphose de la chenille en papillon illustre bien les phénotypes provenant de deux protéomes différents pour un génome identique, c'est-à-dire les caractères apparents différents correspondant à la réalisation d'un même génotype.

Un des objectifs de la biologie systémique consiste donc à découvrir comment un système donné fonctionne et évolue dans son ensemble, par une approche « bottom-up ». Les méthodologies et technologies impliquées ont la particularité de répéter un grand nombre de fois la même manipulation.

À titre d'illustration, il est possible d'analyser le *transcriptome* – qui regroupe toutes les molécules d'ARN transcrits (produites) par les cellules à partir de l'ADN (première étape de la traduction des protéines) – en utilisant des puces à ADN (« DNA-microarray », « DNA chip » en anglais). Tout d'abord, cette technique transforme le contenu en ARN d'un extrait biologique préalablement purifié en ADN complémentaire (ADNc), par rétrotranscription. Durant cette étape l'ADN est marqué par un fluorochrome. Quant à elles, les biopuces sont constituées d'une micro-matrice d'ADN déposée sur un support (une plaque de verre, de silicium ou de plastique) et composée de milliers de fragments d'ADNc qui ont été fixés de manière robotique. Chacun de ces spots d'ADNc contient des picomoles²⁰⁴ d'un ADN spécifique (également coloré, mais avec un fluorochrome différent), c'est-à-dire une entité qui correspond à un « clone » de chacun des transcrits du génome étudié. Ces ADNc de l'échantillon « étalon » pourront s'hybrider avec l'ADNc contenu dans les échantillons biologiques (échantillon « test ») et reformer une hélice d'ADN double brin stable, c'est-à-dire dont les brins resteront fixés ensemble après le lavage final de la puce. Un laser d'un scanner haute résolution pourra alors comparer deux lamelles issues d'un premier échantillon servant de blanc (ou d'étalon) et d'un deuxième qui aura été soumis à une stimulation ou une perturbation. Suite à un traitement lambda ou à une variation des conditions du milieu, les gènes dont l'expression a varié vont apparaître par exemple en rouge ou vert après traitement de l'image informatique, selon si elle a augmenté ou diminué, grâce à la présence du colorant dans le brin d'ADNc. L'intensité d'un spot correspond généralement au niveau d'expression (donc au nombre de copies) du messenger correspondant dans l'échantillon. En résumé, la procédure expérimentale de l'échantillon « test » comprend les étapes suivantes : extraction des ARNm ; marquage des ARN, hybridation ; lavage ; détection et analyse du signal.

Le *protéome* est un second exemple de système biologique couramment investigué par l'intermédiaire des outils et technologies des sciences omiques. Il est constitué par l'ensemble de toutes les protéines

²⁰⁴ Le préfixe pico correspond à 10^{-12} .

exprimées par un génome à un moment donné, à des conditions définies, par une unité biologique donnée. Le protéome n'est jamais statique et est influencé par l'alimentation, l'exposition, les facteurs environnementaux, la santé générale de l'individu, les maladies, l'exposition à des hormones et/ou à des médicaments. Les « unités biologiques » comprennent le compartiment cellulaire (organelle), une lignée cellulaire, un tissu, un organe, un organisme ou encore une communauté d'organismes. Le « moment donné » indique que la protéomique permet de caractériser le phénotype fonctionnel de l'unité biologique en fonction de son état de différenciation cellulaire, de la phase du cycle cellulaire (pour une cellule) ou de la phase de croissance (pour un organisme). Dans l'exemple du papillon cité précédemment, ceci explique pourquoi ses formes larvaire et adulte peuvent être aussi différentes, alors que le génome est resté lui inchangé.

L'analyse à haut débit du protéome passe quant à elle par l'extraction puis par la séparation du mélange de protéines contenu dans un échantillon par électrophorèse bidimensionnelle. Le principe consiste à faire migrer les protéines sur un gel électrophorétique, tout d'abord en fonction de leur charge, et dans un deuxième temps selon leur taille moléculaire. Cette technique de séparation permet alors de visualiser des milliers de protéines sous forme de taches (spots). Les spots de protéines peuvent ensuite être identifiés, caractérisés et quantifiés par analyse d'image spectrométrie de masse. Cette dernière est une technique d'analyse chimique qui permet de détecter et d'identifier les molécules d'intérêt par mesure de leur masse, après fragmentation. Il est alors là aussi possible de comparer deux échantillons protéiques provenant d'extraits divers (d'une organelle, d'une cellule, d'un organe, d'un organisme, etc.) avant et après traitement, et ainsi de quantifier les changements de leur taux d'expression en fonction du temps, des variations des conditions environnementales ou de l'état physiopathologique d'organismes. Le protéomicien peut analyser les informations collectées en interrogeant des bases de données bioinformatiques sur Internet. Ces dernières, dont le nombre et la qualité ont connu une croissance continue ces quinze dernières années, permettent alors de caractériser les protéines détectées par l'intermédiaire de puissants logiciels, par exemple en fonction de leur masse et/ou de la séquence des fragments après digestion enzymatique. La protéomique est utile pour identifier des réponses à des stress cellulaires, et est également utilisée pour assembler des génomes ou pour définir des cibles spécifiques.

6.3.3 D'autres disciplines « omiques » investissent aujourd'hui de multiples systèmes biologiques

Il en va de même pour l'étude d'autres classes de molécules d'intérêt que les gènes, les transcrits et les protéines, tant au niveau cellulaire que d'un organisme entier, avec les développements fulgurants de la *métabolomique* (étude de l'ensemble des métabolites, qui sera abordée au §8.2.5), de l'*épigénomique* (étude des parties non codantes du génome, qui sera traitée au §8.3.2.1), et de la *microbiomique* (étude

de la composition génétique des bactéries de la flore intestinale qui sera introduite au §8.3.3).

Signalons que ces approches peuvent se combiner : la *nutrigénomique* étudie par exemple l'influence des composants d'un régime alimentaire (macro- et micronutriments) sur l'ensemble des gènes d'un individu ainsi que sur les changements métaboliques qu'ils génèrent, y compris leurs impacts sur la santé, comme nous le verrons au §8.3.2.2. Quant à elle, la *pharmacogénomique* permet par exemple de voir quel médicament ou « alicament » est le plus adapté, compte tenu du profil génétique respectivement d'un patient ou d'un individu en bonne santé. Tous ces développements ouvrent la voie vers une nutrition et une médecine personnalisée (§8.3.2.5).

Ajoutons encore le moléculome, l'interactome, le physiome, ou encore le lipidome à la liste des disciplines omiques en développement pour apprécier à quel point les cartographies de systèmes moléculaires et la compréhension de leur dynamique en fonction de perturbations du milieu sont des domaines qui ont le vent en poupe. Les années 2010 semblent donc être celles des découvertes basées sur l'utilisation des nouvelles sciences « omiques » dont les disciplines, ou la combinaison de plusieurs d'entre elles, pourraient bien détenir la clé pour débloquer certains des mystères qui entourent encore notre santé et nos maladies.

Les domaines, thématiques et sujets de recherche liés au champ de recherche de la biologie systémique, qui pourraient être investigués dans le cadre d'un programme Oïkosmos, sont détaillés au §8.

6.4 L'essor du champ des technologies de l'information et de la communication

6.4.1 Avec l'informatique mobile et ubiquitaire, le web 3.0 est devenu l'Internet des objets

Les avancements dans les *nouvelles technologies de l'information et de la communication* (NTIC) ont permis une utilisation mobile généralisée d'ordinateurs portables, de tablettes et de téléphones intelligents. L'hypertechnologie mobile ne cesse ainsi de s'étendre, grâce d'un côté à la miniaturisation et à la puissance décuplée des composants de ces appareils, et de l'autre à la facilitation de la transmission des données via le réseau Internet sans fil, en témoigne les 154 millions de smartphones vendus au deuxième trimestre 2012²⁰⁵ et le cap du milliard de vente annuelle de cette catégorie de téléphone qui pourrait être franchi en 2015 déjà.

Après que le premier web ait relié des machines (des ordinateurs), le web 2.0 des hommes (via les réseaux sociaux), le web 3.0 reliera quant à lui des objets (montres, frigos, voitures, etc.), qui deviendront massivement interconnectés. En fait, cet « Internet des objets » permet déjà actuellement aux utilisateurs qui le souhaitent (et qui en ont les moyens) de collecter de l'information depuis leur environnement physique et leur entourage immédiat, et de la filtrer, de la partager avec un grand nombre d'utilisateurs, de manière décentralisée et distribuée, dans une perspective de communication ubiquitaire. Selon Viviane Reding, commissaire européenne chargée de la société de l'information et des médias : « Le web 3.0 est synonyme d'activités commerciales, sociales et récréatives, en tout lieu, et tout moment, à l'aide de réseaux rapides, fiables et sûrs. Il met fin à la distinction entre connexions mobiles et fixes et annonce une multiplication par dix de la portée de l'univers numérique d'ici à 2015. L'Europe dispose des connaissances et des capacités de réseau nécessaires pour être à la pointe de cette évolution »²⁰⁶. Et d'ajouter : « Nous devons faire en sorte que le Web 3.0 soit créé et utilisé en Europe ». En d'autres termes, un des enjeux futurs de l'UE pourrait bien être l'exploitation à bon escient du web hyperconnecté.

6.4.2 Les technologies embarquées influencent la manière dont les gens vivent

Les technologies embarquées englobent non seulement les objets intelligents comme les smartphones, mais également les montres, les bracelets ou les lunettes, ainsi que les textiles équipés de capteurs permettant de suivre l'évolution de nos paramètres vitaux et des conditions de l'environnement. Avec à

²⁰⁵ Voir le communiqué de presse du cabinet d'études IDC du 08.08.2012 : « Android and iOS Surge to New Smartphone OS Record in Second Quarter, According to IDC » :

www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS23638712

²⁰⁶ Voir le communiqué de presse de la Commission européenne du 29.09.2008 : « La Commission lance une consultation publique sur le Web 3.0 » : http://europa.eu/rapid/press-release_IP-08-1422_fr.htm

la clé la possibilité d'exercer une influence croissante sur la manière dont les gens communiquent, interagissent, veillent à leur santé, s'habillent ou se divertissent.

Le marché des objets connectés est en plein boom et semble être à son apogée en 2015. Il faudra dorénavant compter sur toujours plus de périphériques connectés et de microsystèmes électroniques portés sur le corps donnant accès à divers services. Les secteurs les plus porteurs sont ceux de la santé, du sport, du bien-être, du divertissement et de la sécurité. Il est investi à la fois par des start-ups comme la société suisse *MyoTest*²⁰⁷ pour des niches technologiques à fort potentiel de développement (capteur de mouvements pour le sport de haut niveau ou pour la rééducation) ou par des multinationales comme Nike, Apple (avec des produits comme *Nike+iPod*²⁰⁸ pour le tracking GPS des entraînements de course à pied et leur historisation numérique et l'*iWatch*²⁰⁹) et *Samsung* (dont les derniers smartphones, dès le *Galaxy S4*²¹⁰ sont dotés de nombreux capteurs, à l'image 1) de la technologie *SmartPause* qui permet un suivi du regard qui met sur pause la lecture d'une vidéo lorsque l'utilisateur détourne le regard, ou 2) de *AirGesture*, un capteur de mouvement). D'autre part, des projets comme *Google Glass*²¹¹ sont censés remplacer à terme les smartphones et tablettes dans leur rôle de terminal d'accès omniprésent. Des fonctionnalités diverses sont intégrées, comme celles de GPS (*Google Maps*), de reconnaissance vocale (à l'image du système *Siri* du système d'exploitation iOS d'*Apple*) capable de requête web quasi instantanée (consultation de résultats sportifs, d'actualités financières, réservation de places pour le restaurant, de produits d'un magasin). Les lunettes de la firme californienne diffusent des sons, et projette des images et des vidéos en transparence (avec des fonctions de conversation ou de visioconférence de type *Skype* ou *Facetime*, de partage de photos, etc.)²¹².

En résumé, on peut dire que le marché est en pleine effervescence !

Côté santé et dans un souci de constante sécurité personnelle, de bien-être ou de maîtrise des coûts, une population grandissante d'utilisateurs souhaite collecter ses données physiologiques au jour le jour et les interpréter via son téléphone portable avec ou sans l'assistance d'un professionnel de la santé.

Les nouvelles TIC ont généré de nouvelles utilisations et de nouvelles relations en termes de surveillance de la santé personnelle. Analyser le comportement de son propre corps jour et nuit est devenu une tendance actuelle. Par exemple, le mouvement « Quantified self »²¹³ est apparu comme un véritable phénomène social, une façon de se connaître soi-même à l'image de la psychanalyse. A la différence

²⁰⁷ Site web de MyoTest : <http://www.myotest.com>

²⁰⁸ Site web de Nike + iPod : www.apple.com/fr/ipod/nike/

²⁰⁹ Site web de l'iWatch : www.apple.com/watch/

²¹⁰ Site web du produit : www.samsung.com/ch_fr/promotions/galaxys4/

²¹¹ Site web du « Project Glass » de Google : www.g.co/projectglass, dernière consultation, le 26.07.2012

²¹² Voir la vidéo www.youtube.com/watch?feature=player_embedded&v=9c6W4CCU9M4 (dernière consultation le 28.08.2012)

²¹³ Voir par exemple : www.quantifiedself.com

que par la mesure de soi, il s'agit ici non pas de mots, mais de chiffres, pour arriver plus ou moins au même résultat. Pour l'instant, ces données numériques « addicts » mesurent surtout des données de santé (TA-Swiss 2018). Selon les leaders du mouvement « Quantified self », on ne sait gérer que ce que l'on mesure « notamment pour les personnes malades. L'objectif est donc de savoir comment influencer les résultats et obtenir les courbes les plus favorables (Guillaud 2011; Guillaud 2012; Gadenne 2012).

Bien entendu, une telle propension à entrer systématiquement ses données personnelles ne touchera pas la majorité des utilisateurs de supports informatiques, mais le bassin de population pouvant être touché est suffisamment conséquent pour être considéré comme non négligeable par certaines compagnies privées.

Plus concrètement, le recours aux nouvelles technologies du numérique offre de nos jours aux personnes en situation de handicap (individus malvoyants, malentendants ou à mobilité réduite) des solutions pour communiquer, acheter ou interagir en société²¹⁴, voire se réhabiliter au moyen de différents périphériques dédiés. Par exemple, l'application iPhone *Ariadne GPS*²¹⁵ permet aux personnes aveugles de demander à tout moment des informations sur leur position (en donnant le nom des villes ou des lieux, les numéros des rues, etc.), en étant accessible par la parole (en utilisant les fonctions *VoiceOver* ou *Siri*). Elle facilite également l'exploration d'un lieu ou le parcours d'un itinéraire favori en permettant l'ajout de points préférés et la réception d'alertes sonores lorsqu'on s'en approche.

Le secteur du divertissement profite, quant à lui, déjà largement de ces nouvelles technologies, avec par exemple le développement d'interfaces de jeu (« wearable games ») à l'instar du projet Woven²¹⁶ (une plateforme de jeu distribuée et portative) ou de capteurs de mouvement comme le produit *Kinect* pour *Xbox 360* de Microsoft²¹⁷.

En parallèle, on constate une tendance des utilisateurs de nouvelles technologies à enregistrer et archiver toutes sortes d'informations sur leur vie, une activité de « lifelog » (ou « lifeblog »). Ces informations incluent des textes, des informations visuelles, des fichiers audio, l'activité média, bref un large éventail d'informations. Ces pratiques accumuleront quantités d'informations permettant de mieux appréhender notre humeur en fonction d'un contexte donné. Nos smartphones permettent aussi de sonder quasi systématiquement notre santé et nos activités sportives ou sociales, pour autant bien sûr que l'utilisateur accepte d'alimenter fréquemment et de partager ces éléments sur des serveurs ou les données anonymes seront ensuite interprétées par des professionnels de la santé (psychologues, sociologues, médecins, entraîneurs, etc.), métamorphosant les relations soignants-patients.

²¹⁴ <https://itunes.apple.com/ch/app/ariadne-gps/id441063072?l=fr&mt=8>

²¹⁵ Site web du développeur : www.ariadnegps.eu et lien pour le téléchargement sur l'iTunes Store : <https://itunes.apple.com/ch/app/ariadne-gps/id441063072?l=fr&mt=8>

²¹⁶ Site web du projet Woven : <http://wearablegames.eu>

²¹⁷ Site web de Kinect : <http://www.xbox.com/fr-FR/Kinect>

Pour les malades chroniques, il s'agit aussi de données biologiques provenant de capteurs sur le corps. Elles peuvent servir soit à alerter l'utilisateur qu'il est nécessaire de prendre un médicament (injection d'insuline dans le cas d'un patient diabétique), ou alors suggérer d'entamer un exercice physique suite au constat d'un trop grand manque d'activité ou de mobilité (grâce à un podomètre) par l'utilisateur surveillé. D'autre part, ces données peuvent être archivées pour le bénéfice du lifelogger, voire même partagées avec d'autres à des degrés divers (récapitulatif des paramètres cardiovasculaires durant une course géolocalisée avec vitesse instantanée tout au long du parcours), ou contrôlées par lui seul.

De manière intéressante, les données récoltées et leur lot de métadonnées (heures, position GPS, météo locale, etc.) permettent de déterminer les facteurs de l'environnement (naturel, social, géographique, etc.) et sont à même d'influencer notre état psychologique et physiologique. À titre d'exemple, de simples accéléromètres portés sur le poignet permettent de déduire de manière fiable combien de cigarettes et de bouffées sont inhalées en une journée par un fumeur (Raiff et al. 2014). Ce type de technologie s'adresse en particulier aux jeunes générations qui s'adaptent et maîtrisent plus facilement les nouveaux appareillages et logiciels informatiques.

Certains paramètres psychologiques de lifelogs nécessitent d'être patiemment remplis suite aux demandes quotidiennes d'applications de management de l'humeur sur notre iPhone (à l'image du système *Siri* de reconnaissance vocale qui pose sa systématique question quotidienne « bonjour, comment allez-vous aujourd'hui ? »). La prochaine génération de capteurs intelligents permettra peut-être à des senseurs de détecter nos émotions. Des logiciels et des applications proposeront alors de nous aider à maintenir notre humeur au beau fixe, selon le niveau de stress mesuré (rythme cardiorespiratoire, taux de CO₂ ambiant), en nous suggérant telle ou telle activité physique ou décontractante.

De plus, ces démarches pourraient chercher à mettre en avant leur effet addictif, à l'image des jeux de rôles où le joueur cherche à constamment améliorer les points de vie ou de compétences diverses des personnages. Il s'agirait ici de collecter des points de santé ou de bonheur, et d'éviter d'en perdre. Afin de maintenir la motivation des utilisateurs, de telles données sont saisies via des mini-questionnaires ne nécessitant souvent que quelques secondes, par exemple en déplaçant quelques curseurs et les questions sont rappelées à l'utilisateur via des notifications automatiques, personnalisables, et potentiellement pluriquotidiennes. On est dès lors sollicités en tout temps à répondre à de telles requêtes, parfois dans des situations de stress (au travail ou au volant par exemple).

Toutefois, la perspective d'une généralisation de ces services semble encore lointaine et l'acceptation par les utilisateurs d'être « épiés » constamment n'est pas gagnée d'avance, même s'il s'agit d'améliorer leur santé psychologique. N'en reste pas moins qu'une multitude de voies d'utilisation sont explorées à travers le monde. Ce phénomène est accéléré par l'explosion de l'innovation ouverte, ou encore par la démocratisation des imprimantes 3D. Dans ce contexte, de simples amateurs de ces technologies embarquées peuvent devenir des adeptes d'une sorte de « bricolage 2.0 » (« do it yourself » ou DIY) et

élaborer des objets connectés (« devices ») « dans leur garage » et à moindres frais, mais avec un investissement en temps souvent significatif. Certains des « prototypes » développés peuvent ensuite être industrialisés grâce aux multiples possibilités d'externalisation ouverte (« crowdsourcing ») ou de financements participatifs (« crowdfunding »), discutés au §18.

Enfin, signalons que de nombreuses études de marché prévoient dès 2014 une véritable explosion des ventes des technologies portables et connectées d'ici l'horizon 2016-2020 (Aprobase International 2013), en particulier pour les vêtements intelligents (« smart clothes »), les lunettes intelligentes (« smart glasses »), ainsi que les bracelets et montres intelligentes (« smart watches »). L'évolution des ventes de l'*iWatch*, arrivée au printemps 2015 et déjà vendue à trois millions d'exemplaires en seulement trois mois²¹⁸ semble bien confirmer cette tendance.

6.4.3 La R&D sur les capteurs intelligents se situe à la convergence des NTIC, des cleantechs et des medtechs

La recherche se préoccupe depuis plusieurs années de la connectivité des objets que l'on porte afin d'améliorer notre quotidien. Avec des institutions comme le CSEM (§5.2.1.4) et l'EPFL (§5.2.1.3), la Suisse occidentale est bien à la pointe de la R&D dans le domaine des NTIC et des micronanotechnologies, en particulier au niveau des cleantechs et des medtechs.

La Commission Européenne a par exemple financé de nombreuses initiatives, dont le projet phare MyHeart²¹⁹, dans lequel des institutions de recherches suisses comme le CSEM ont joué un rôle clé. Toujours en collaboration avec le CSEM, le développement de boîtiers miniaturisés permet d'envisager de nouvelles opportunités pour le suivi des fonctions vitales à distance et l'adaptation aux conditions extrêmes. Lors de ses précédentes expéditions, l'état de santé de l'aventurière suisse Sarah Marquis²²⁰, habituée à marcher plusieurs milliers de kilomètres à chacune de ses expéditions, a par exemple été suivi en direct par des spécialistes des effets de l'altitude sur le système cardiovasculaire et respiratoire du CHUV, grâce à un appareil mesurant la fréquence cardiaque et le taux de saturation d'oxygène sanguin, la masse liquide dans le corps. Concrètement, le principe fait appel à une LED qui envoie des infrarouges à travers les tissus. Un capteur récupère ensuite ce signal lumineux qui est atténué en fonction de la quantité de sang pulsée dans les tissus. Une mesure d'accélération soustrait les perturbations liées aux mouvements du corps. Pour mesurer le taux de saturation du sang en oxygène, une deuxième longueur d'onde est envoyée par le même appareil. Une carte électronique, insérée dans le téléphone portable de

²¹⁸ Lire « sur le blog de Xavier Comtesse, : <http://xcomtesse.blog.tdg.ch/archive/2015/07/02/apple-numero-1-de-la-montre-en-2016-268473.html> (dernière consultation le 09.07.2015)

²¹⁹ Description du projet "MyHeart" (2004-2008), Fighting cardio-vascular diseases by prevention and early diagnosis, doté de 35 millions d'Euros : www.hitech-projects.com/euprojects/myheart/

²²⁰ Voir sa biographie sur le site web : www.sarahmarquis.ch/pg/pages/view/163/bio

la sportive, permet d'amplifier les signaux lumineux et de les transformer en signaux numériques. Il s'agit de la même technologie que celle qui pourrait être utilisée par l'ESA pour équiper les astronautes lors de missions martiennes. La spécificité de tels systèmes réside essentiellement dans leur miniaturisation, leur robustesse et leur légèreté. À terme, l'idée serait d'étendre cette technologie aux sportifs ou à la télémédecine de manière générale. Certains patients, présentant des problèmes cardiaques, pourront être reliés à l'ordinateur de leur médecin, via une oreillette, tout en continuant de vivre normalement, l'appareil permettant de mesurer la masse liquide dans le corps. Version miniaturisée de la balance à électrode, l'outil donnera des indications sur le risque de déshydratation et offre des opportunités intéressantes pour des applications comme les télésoins aux personnes âgées, aux habitants isolés, et également pour le soutien aux sportifs de l'extrême (alpinistes, etc.).

Le projet Nano-Tera de la Confédération suisse (§5.2.1.6.c) a quant à lui permis le développement de microsystèmes électromécaniques intégrés de type MEMS (voir §9.3.1) comme LiveSens²²¹ (microbioréacteurs permettant la détection de micropolluants dans les eaux), IrSens²²² (pour la détection des gaz) et NanowireSensor²²³ (pour la détection de molécules présentes en très faible concentration).

Plus récemment, le projet de recherche Flagship « Guardian angels, for a smarter life » a été retenu parmi les six projets amiraux du FET²²⁴ (Future and Emerging Technologies). Deux des projets de cet incubateur des technologies de l'information de la Commission européenne ont obtenu un budget de plus d'un milliard d'euros sur 10 ans (dont un piloté par l'EPFL, le Human Brain Project, voir §5.2.1.6.a). S'il n'a pas fait partie des gagnants finaux, Guardian angels²²⁵ se poursuit avec un budget moindre et implique le savoir-faire des deux écoles polytechniques fédérales, qui coordonnent les 28 partenaires du programme. Il propose de développer des senseurs miniaturisés économes en énergie, soit de véritables compagnons électroniques intégrés non seulement dans nos smartphones, mais également dans d'autres objets quotidiens. Bien camouflés, ces capteurs intelligents dissimulés dans un vêtement ou un « tatouage » électronique existent donc déjà bel et bien en laboratoire. Il ne s'agirait donc ici que d'accélérer leur industrialisation afin de produire une première série ces prochaines années, avec pour objectif principal la réduction radicale de la consommation de composants électroniques. De tels capteurs visent à surveiller autant notre corps que notre environnement et intégrer des objets électroniques portatifs totalement autosuffisants en énergie et pouvant posséder des fonctions liées par exemple à la santé, à la communication ou au transport.

Ces projets démontrent l'intérêt actuel à développer des microsystèmes de type MEMS, dont un des

²²¹ Liste de publications liées au projet LiveSens : www.nano-tera.ch/projects/57.php#publications

²²² Liste de publications liées au projet IrSens : www.nano-tera.ch/projects/80.php#publications

²²³ Liste de publications liées au projet NanowireSens : www.nano-tera.ch/projects/61.php#publications

²²⁴ FET Flagships Initiatives : cordis.europa.eu/fp7/ict/programme/fet/flagship/home_en.html

²²⁵ Site du projet « Guardian angels for a smarter life » : www.ga-project.eu

enjeux n'est rien d'autre que de se rapprocher de la performance énergétique des écosystèmes vivants à l'image de « MEMS naturels » tels que les vibrisses des félins. Ces derniers sont des capteurs tactiles grâce auxquels ils perçoivent les variations de pression dans l'air. Cet organe sensoriel leur permet par exemple de détecter des mouvements à proximité.

La convergence des nouvelles technologies de l'information, des cleantechs et des hautes technologies médicales généralisera probablement l'accès dans un futur proche à des microcapteurs et des senseurs capables de réduire les risques pour la santé en améliorant la prévention de maladies (contribuant ainsi à la baisse des coûts médicaux), mais aussi susceptibles d'améliorer l'interaction entre les utilisateurs et leur environnement. De telles puces seront ainsi à même d'offrir de nouvelles possibilités, via le développement de bioMEMS mesurant des paramètres biologiques ou vitaux ou celui d'enviroMEMS monitorant l'environnement (§9.3.1).

Cette généralisation des technologies embarquées et l'appui de l'informatique ubiquitaire orientent désormais la recherche vers un « computing perceptuel ». Nos équipements et nos ordinateurs analyseront en permanence notre environnement grâce des capteurs, des caméras, etc. ce qui permettra de commander nos machines par des gestes, sans même toucher l'écran ou le touch-pad, et de piloter son curseur avec beaucoup de finesse via des mouvements du regard. Signalons enfin que les interfaces entre la machine et l'homme évoluent très vite, et nécessite beaucoup de puissance de calcul, ce qui n'est pas sans conséquence en termes d'impact énergétique.

Les domaines, thématiques et sujets de recherche liés au champ de recherche sur les technologies de l'information et de la communication qui pourraient être investigués dans le cadre d'un programme Oikosmos sont détaillés au §9.

Dans le contexte des ECA, ces champs de recherches clés sont fortement *interdépendants*, même si certains des domaines, thématiques et sujets qu'ils englobent peuvent sembler éloignés au premier abord. En effet, un simulateur d'ECA doit *intégrer* une multitude de technologies pour assurer le fonctionnement optimal de ses équipements et appareillages. À titre d'exemple, le programme Oikosmos pourrait bénéficier fortement de la mise en place un monitoring en continu de la santé de ses organismes via des capteurs intelligents à la fois :

- ultra-efficacients (voire autonome) d'un point de vue énergétique – par optimisation de leur performance environnementale – et miniaturisés (*champ de l'écologie industrielle*) ;
- capables de récolter « en masse » des données biologiques sur la santé des organismes, via un échantillonnage permettant d'effectuer des tests sur des systèmes de molécules entiers tels que le génome, le protéome ou le métabolome (*champ de la biologie systémique*) ;

- dotés de capacités de télécommunication vers des serveurs capables d’analyser, d’interpréter et d’exploiter leurs données, en fournissant en retour des informations pertinentes via des interfaces humain-machine conviviales (*champ des technologies de l’information et de la communication*).

Ceci illustre parfaitement l’intérêt d’un simulateur d’ECA pour le déploiement d’une démarche réellement interdisciplinaire, à la convergence de trajectoires technologiques en plein développement.

Les trois champs disciplinaires terrestres à fort potentiel « synergistique » maintenant introduits, les prochains chapitres s’intéressent au catalogage des synergies de recherche terrestres et spatiales y relatives, qui pourraient être établies dans le cadre du programme Oïkosmos, en particulier des investigations aux frontières de la recherche en écologie industrielle (§7), en biologie systémique (§8), et sur les technologies de l’information et de la communication (§9), auquel s’ajoute un quatrième volet – plus transversal, car combinant les précédents – et lié à la notion d’habitat clos et durable (§10). Les connexions entre les champs de recherche du rapport et les concepts relatifs à la notion d’habitat clos et durable seront présentés dans le Tableau 1 au §10.1.

Ensemble, ces quatre chapitres de la Partie II constituent ci-après l’agenda de recherche préliminaire pour une recherche synergistique sur les écosystèmes clos artificiels et sur les habitats sous fortes contraintes (Figure 10).

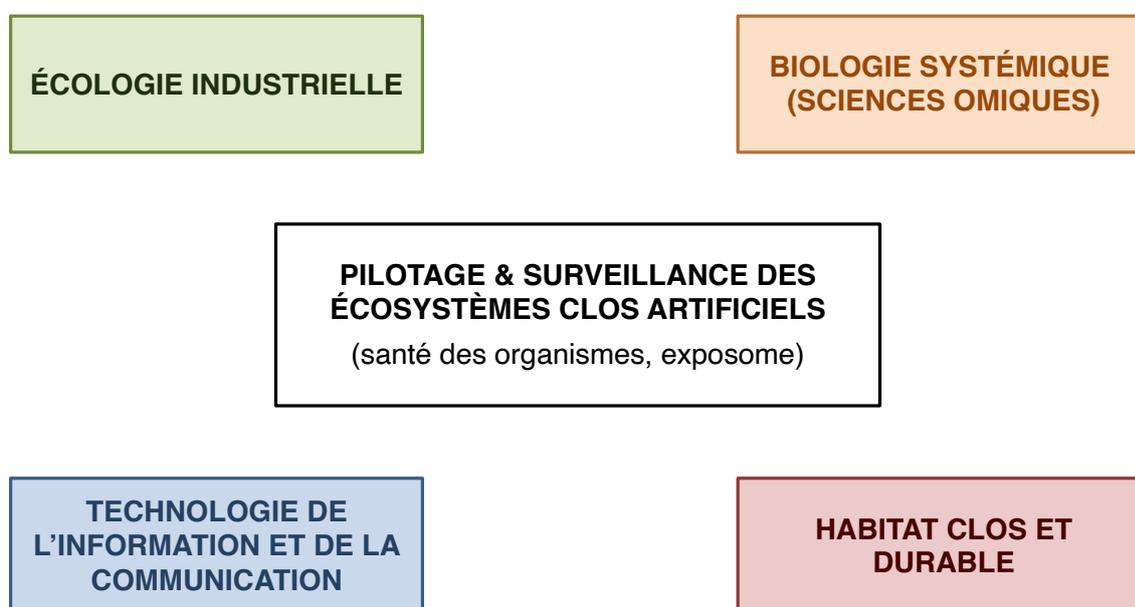


Figure 10: Les thèmes de recherche du programme Oïkosmos.

Les thèmes de recherche synergistiques du programme Oïkosmos s’articulent autour des quatre thématiques ci-dessus qui font l’objet de la Partie II, qui permettent ensemble d’appréhender comment piloter et surveiller les ECA au niveau de la santé des organismes et des conditions environnementales, équivalente à l’exposome de l’ECA (discuté au §7.3.3)

7 Investigations aux frontières de la recherche en écologie industrielle

7.1 Les synergies de recherche liées au champ de l'écologie industrielle

7.1.1 La pertinence de l'écologie industrielle pour le programme Oïkosmos

Plusieurs des approches et concepts qui caractérisent l'écologie industrielle semblent tout à fait pertinents dans le cadre d'un programme de recherche tel qu'Oïkosmos :

- une vision globale, intégrée, de tous les composants du système industriel et de leurs interactions avec la Biosphère, permettant d'investiguer les limites du recyclage (§6.2.1) ;
- une prise en compte des contraintes de la Biosphère (ressources finies, perception des limites, résilience diminuée, etc., cf §6.1.4), qui risque de se renforcer à l'avenir. Ceci permet l'anticipation des contraintes terrestres qui pourraient bien devenir de plus en plus analogues aux contraintes écosystémiques propres aux ECA ;
- une approche bioinspirée dans laquelle la Biosphère devient un modèle pour le système économique (§6.2.3).

Les connaissances sur l'évolution de la vie sur Terre offrent des perspectives pertinentes pour réfléchir sur l'évolution du système industriel, lequel résulte également d'une longue histoire évolutive. Au début de la vie, les ressources potentielles étaient si vastes, et la quantité d'organismes si minime, que leur présence exerçait un impact négligeable sur les ressources disponibles. Cette configuration d'écosystème représentait un processus linéaire de flux de matières indépendants, avec des déchets pouvant être produits de manière illimitée. La vie a pu assurer les conditions de son développement à long terme, dont la société industrielle pourrait s'inspirer, comme nous allons le voir ci-après, grâce à une longue succession d'« inventions » afin de mieux s'adapter au milieu ambiant : fermentation anaérobique, puis aérobique, puis photosynthèse. L'analogie entre les débuts de la vie sur Terre et le fonctionnement de l'économie moderne est frappante : le système industriel actuel est une collection de flux linéaires qui s'ignorent entre eux (Erkman 2004). Ce fonctionnement, consistant à extraire des ressources et à rejeter des déchets, constitue la source des problèmes environnementaux auxquels nous sommes confrontés. Pour devenir viables, les écosystèmes biologiques ont évolué jusqu'à devenir presque entièrement cycliques, entraînant la disparition de la distinction entre ressources et déchets générés par un organisme, ces derniers devenant une ressource pour un autre organisme. Au sein d'un tel système, les nombreux cycles, interconnectés et auto-entretenus par l'énergie solaire (seul apport extérieur à la Biosphère), fonctionnent sur des échelles temporelles et spatiales variées. Idéalement, la société industrielle devrait s'approcher autant que possible d'un tel écosystème (Reddy et al. 2012;

Erkman & Besson 2010). L'étude et le développement des ECA représentent un pas (et à terme peut-être un bond) dans cette direction.

Si la notion de « bioinspiration » n'implique pas pour autant de chercher à copier purement et simplement la Biosphère, les ECA représentent néanmoins une formidable opportunité de s'inspirer des connaissances sur les écosystèmes biologiques pour déterminer les transformations susceptibles de rendre le système industriel compatible avec un fonctionnement « normal » de la Biosphère.

Pour simplifier, un ECA peut être réduit, dans la perspective de l'écologie industrielle, à un convertisseur de déchets et un régénérateur de matières premières (oxygène, eau, nourriture). De sorte qu'il permet également d'imiter et de raccourcir les cycles biogéochimiques en utilisant des processus biologiques ou hybrides.

Les ECA peuvent être à la fois considérés comme de mini écosystèmes naturels, certes fortement artificialisés et, précisément du fait de cette dernière caractéristique, être envisagés comme de mini écosystèmes industriels (Figure 11).

Un simulateur de tels écosystèmes « hybrides » se profile comme une plateforme expérimentale et inédite, permettant de tester toute une série de hautes technologies nécessaires non seulement à la préparation d'une « Mission Mars » (§4.2.2.2.a), mais également celles susceptibles d'améliorer la performance environnementale de systèmes de recyclage (§4.2.2.2.b).

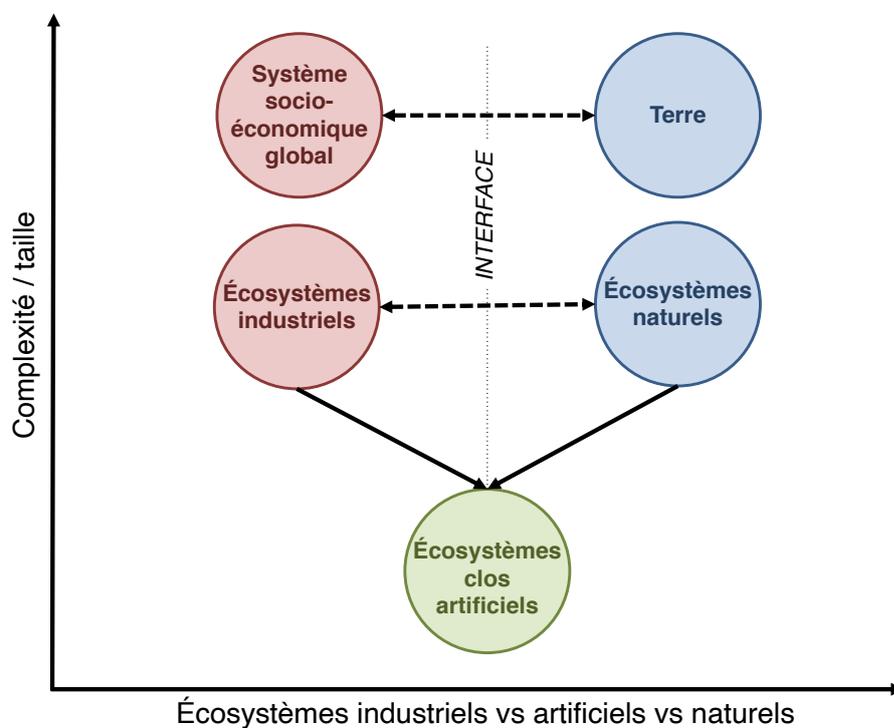


Figure 11: Les ECA à la convergence des écosystèmes industriels et naturels.

Source: adapté de Suomalainen (2012)

La portée du programme Oïkosmos profile le simulateur d'ECA non seulement comme un outil utile à l'exploration des aspects spécifiques des écosystèmes industriels et naturels, mais également comme une installation expérimentale permettant de maîtriser les contraintes d'un habitat parfaitement clos. Sur le long terme, les activités d'un démonstrateur de ce type permettraient de concevoir des stratégies à plus grande échelle et participeraient ainsi à faire évoluer système industriel vers un développement durable. Dans cette perspective, le développement effectif d'un tel « laboratoire de la durabilité » (Suomalainen 2012) peut être envisagé indépendamment du spatial, au vu de son potentiel intrinsèque pour une recherche terrestre sur les écosystèmes, dont les ECA représentent une version extrême.

7.1.2 Le simulateur d'ECA : un « couteau suisse » pour l'analyse des flux de matières, de molécules et d'informations circulant au sein d'écosystèmes

Pour rappel, le rôle crucial d'un ECA (§4.1.2) consiste à fournir des fonctions de « soutien » strictement indispensables à la survie d'un équipage humain évoluant au sein d'un habitat clos, soumis à de fortes contraintes. Les « fortes contraintes » font référence aux conditions extrêmes d'isolement, de confinement, de ressources alimentaires limitées, etc. discutée au §6.1.4). En combinant des appareillages, des équipements et des technologies adéquats, l'installation doit favoriser l'accomplissement d'une recherche *intégrée*, au carrefour des champs d'étude de l'écologie industrielle (§6.2), de la biologie systémique (§6.3 et §8), et des technologies de l'information et de la communication (§6.4 et §9).

Un démonstrateur d'ECA semble à même de jouer le rôle de véritable « couteau suisse » tant pour générer que pour analyser les différents flux d'un écosystème. Ces flux circulent au sein de l'ECA : ils entrent, sortent et traversent les divers compartiments qui le composent, faisant ainsi varier en permanence leur contenu respectif. Il s'agit bien entendu de flux de matières et d'énergie, mais également de flux d'informations et de connaissances. Par ailleurs, chacun des trois champs de recherche qui font l'objet de la présente étude se focalise principalement sur une composante « écosystémique » des ECA :

- l'écologie industrielle traite l'ECA comme un *écosystème industriel* et s'axe sur les flux de matières et d'énergie qui le traverse ;
- la biologie systémique considère l'ECA comme un *écosystème biologique* et se concentre sur les flux de molécules qui y circulent ;
- les technologies de l'information et de la communication envisagent l'ECA comme un *écosystème informationnel* et se focalisent sur les flux d'informations et de connaissances qui s'y génèrent et s'y propagent.

L'agenda de recherche du programme scientifique et technologique Oïkosmos doit permettre aux chercheurs de nombreuses disciplines d'une part d'expérimenter leurs protocoles de recherche portant sur chacun de ses flux et, d'autre part, d'interagir fortement dans une perspective d'interdisciplinarité et de transdisciplinarité, comme on le verra dans la Partie III (§16). En conséquence, les synergies de recherches peuvent être envisagées dans une perspective globale, aussi bien au niveau des compartiments et des organismes de l'écosystème, qu'au niveau des cycles et des flux de matières, d'énergie et d'informations qui y circulent.

Plus concrètement, un simulateur d'ECA est une boîte à outils pour accomplir des activités de recherche variées – non successives, mais corrélées –, pour la mesure, la modélisation, le pilotage, la biosurveillance et le maintien de l'homéostasie de l'ECA, avec pour objectifs :

- *Mesure et détection* : analyser, comprendre et interpréter les flux de l'écosystème (voir par exemple le §7.3.3.2.d sur l'analyse de la distribution de micropolluants et contaminants chimiques) ;
- *Modélisation et simulation* : prédire, anticiper et évaluer les risques de l'écosystème (voir par exemple le §9.2.1 sur la modélisation mathématique de systèmes complexes) ;
- *Pilotage, exploitation et optimisation* : produire les différents composants de l'écosystème, gérer et valoriser ses flux, améliorer l'écosystème dans son ensemble, en situation de routine – mais en conditions extrêmes –, durant les activités quotidiennes de l'équipage (voir par exemple le §7.3.2 sur l'optimisation de la performance de cultures de micro-organismes) ;
- *Biosurveillance de l'environnement et de la santé* : monitorer, surveiller et contrôler l'exposome (abordé au §7.3.3) afin de maîtriser les risques, de diagnostiquer un trouble et d'identifier ses causes ; évaluer les effets de l'exposome sur la santé des organismes (discuté au §8.2) ;
- *Maintien de l'homéostasie dans les limites prédéfinies et application de contre-mesures* : réagir, influencer activement, réguler et pérenniser l'écosystème ; prévenir, traiter, soigner et remédier aux effets ou aux impacts négatifs de l'exposome sur la santé des organismes, y compris en situations imprévues, exceptionnelles ou d'urgence (explicité au §7.3.4.3 sur la capacité d'adaptation aux changements des conditions écosystémiques).

La réalisation de ces activités de R&D doit permettre d'optimiser les processus opérationnels de l'ensemble des flux circulants et interagissant au sein de l'ECA, afin d'assurer sa pérennité initialement durant toute la durée d'une campagne de simulation, avec pour objectif ultime de l'accomplir dans le cadre d'une « mission Mars ».

Les prochains chapitres détaillent les thématiques de recherche liées au champ de l'écologie qui semblent pertinentes pour Oïkosmos, selon le découpage suivant :

- l'approfondissement des concepts, des stratégies, des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle (§7.2) ;
- le pilotage fin et l'optimisation des conditions écosystémiques (§7.3) ;
- le développement de systèmes de recyclage hautement efficaces (recyclage intégral) (§7.4).

7.2 L'approfondissement des concepts, des stratégies, des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle

Tout d'abord, un simulateur d'ECA et d'habitat clos représente un dispositif remarquable pour l'approfondissement à la fois des concepts et des stratégies, ainsi que des méthodologies et des outils de l'écologie industrielle. Dans cette perspective, il se révèle être :

- un cadre pour la consolidation du concept d'écologie industrielle (§7.2.1) ;
- un modèle pour l'écorestructuration de l'écosystème industriel (§7.2.2) ;
- un vecteur pour le développement des analyses de flux de matières dynamiques (§7.2.3) ;
- un laboratoire pour le test, la modélisation et le développement de réseaux alimentaires « industriels » (§7.2.4) ;
- un moteur du perfectionnement de l'évaluation des impacts (méthodologie de l'analyse de cycle de vie) (§7.2.5) ;
- un support pour le développement de la notion de durabilité systémique (§7.2.6).

7.2.1 Un cadre pour la consolidation du concept d'écologie industrielle

L'homme a depuis toujours une soif de connaissance, l'incitant à explorer les frontières du monde qui l'entoure. Au vingtième siècle, la propension humaine à expérimenter de nouvelles aventures passionnantes lui a permis de dépasser les limites terrestres. À présent, l'homme cherche à se rendre bien au-delà de l'orbite basse terrestre, et aspire à une exploration spatiale interplanétaire. L'ambition de fouler un jour le sol d'une autre planète du système solaire – voire de la coloniser – dépend du développement et de l'exploitation de (sous-)systèmes de support-vie avancés (ALSS), indispensables au succès de l'établissement d'une base martienne. Raison pour laquelle les agences spatiales se penchent depuis plus d'une cinquantaine d'années sur la conception et l'élaboration d'écosystèmes miniaturisés tels que les ECA spatiaux.

Comme évoqué précédemment au §6.2.1, le concept d'écologie industrielle est basé sur une analogie (et non pas une correspondance exacte) entre le fonctionnement des écosystèmes naturels et celui du système industriel. Une installation telle qu'un simulateur d'ECA peut être envisagée comme un outil empirique tout à fait approprié pour approfondir la compréhension et tester la validité de cette analogie. Il sera nécessaire de recréer un écosystème ex nihilo, puis de maximiser et de pérenniser la santé de l'ensemble de ses organismes. Un tel écosystème clos peut être considéré comme un exemple d'environnement naturel poussé à l'extrême. Un ECA spatial peut même être considéré comme l'écosystème industriel « ultime », au vu de son hyperartificialisation.

Néanmoins, le fonctionnement correct d'un ECA est totalement dépendant d'un écosystème biologique en bonne santé, tant au niveau des micro-organismes, que des plantes qui le constituent. Dans un tel

ALSS, le système dans son ensemble, c'est-à-dire son hardware, les organismes vivants qu'il contient, ainsi que les stocks de ressources à disposition, représentent une entité complètement autosuffisante qui ne doit dépendre d'aucun flux entrant en provenance de son environnement immédiat. En d'autres termes, un ECA au sens strict ne doit être alimenté d'aucun apport externe de ressources, à l'exception de l'énergie solaire.

Fondamentalement, les ECA spatiaux n'ont pas affaire aux mêmes contraintes que les systèmes terrestres. Alors que les ressources sur Terre sont limitées par les coûts économiques, environnementaux et énergétiques ; dans l'espace, la masse des ALSS est le principal facteur limitant, au vu des coûts exorbitants du lancement de ce type d'équipement. De plus, bien que les ressources terrestres possèdent leurs limites physiques absolues, il existe actuellement une certaine flexibilité dans leur choix : lorsque l'une d'entre elles vient à manquer, il est généralement possible de s'approvisionner avec une équivalente au sein de la même catégorie de ressources matérielles (Suomalainen 2012). En contraste, la quantité de ressources embarquée à bord d'une navette est fixe et ne peut pas être facilement augmentée, alors qu'un ravitaillement en cours de mission ne sera certainement pas possible pour combler les déchets relâchés qui n'auraient pas pu être recyclés. Par voie de conséquence, les ressources doivent impérativement être remises en circulation dans le système de manière aussi efficiente que possible, afin que la plus faible quantité possible de déchets soit émise. Néanmoins, relevons que pour la partie de la mission qui se déroule sur le sol martien, l'exploitation des ressources in situ (par ISRU) permet d'envisager une plus grande flexibilité, par exemple en bénéficiant d'un apport externe de carbone par valorisation du CO₂ (production de biocarburant synthétique, agrandissement des cultures des serres martiennes, synthèse de produits biosourcés, etc. (§7.4), même si ceci exige une quantité non négligeable d'équipements qui devront probablement être préalablement envoyés sur le site d'amarsissage.

Comme les ALSS spatiaux ne sont toujours pas complètement circulaires au stade actuel de développement technologique, ils ne peuvent pas être considérés comme des écosystèmes industriels parfaits. Malgré les conditions extrêmes auxquelles il opère, un ECA tel que MELiSSA est plutôt un cas *simplifié* d'écosystème industriel, puisqu'il n'interagit pas avec l'environnement naturel (au moins lorsqu'il n'est pas implanté sur une planète extraterrestre) et n'inclut pas de composante spatiale (échelle locale vs globale)²²⁶. La situation n'est donc bien entendu pas aussi complexe que le système économique ou qu'un écosystème naturel composé de plusieurs centaines, voire milliers d'espèces. Néanmoins, il est bien plus proche de la réalité que bien des modèles expérimentaux simplifiés à l'extrême, à l'image de ceux dont disposent les laboratoires de recherche de nos jours. On peut ainsi

²²⁶ Si les agences spatiales comme l'ESA s'intéressent depuis de nombreuses années au management des écosystèmes terrestres, en développant et envoyant des satellites permettant leur observation et leur surveillance à distance, le simulateur d'ECA permettra quant à lui l'exploration du comportement de systèmes biologiques à plusieurs autres échelles spatio-temporelles, inférieures à celles basées sur les télécommunications.

considérer qu'un ECA opère à un niveau de complexité « méso » (cet aspect sera détaillé au §7.3.1.2), c'est-à-dire permettant d'investiguer des bioprocédés aussi bien à l'échelle des cellules microbiennes – des « micro-usines cellulaires » – qu'à celles de réseaux métaboliques, en exploitant des appareillages tels que bioréacteurs et des chambres de culture végétale, tant au niveau du laboratoire qu'à celui d'une installation pilote et d'une navette. Ainsi, on peut tout de même considérer les ECA spatiaux comme des systèmes *quasi* circulaires des plus sophistiqués, efficaces et économes en ressources dont le fonctionnement technique a été optimisé au maximum, et qui permettent de tendre vers un recyclage intégral des flux de matières.

Somme toute, un simulateur d'ECA représente un excellent compromis afin de développer les bases théoriques de l'écologie industrielle, comme nous allons le voir dans les chapitres suivants.

7.2.2 Un modèle pour l'écorestructuration de l'écosystème industriel

Un des champs d'action de l'écologie industrielle est l'« écorestructuration » du système économique. Cette « écotransition », introduite au §6.2.3, s'intéresse aux stratégies de « maturation » de l'écosystème industriel. Plus concrètement, elle consiste à explorer (et optimiser) essentiellement quatre dimensions et principes opérationnels de l'écologie industrielle (Erkman 2004), à savoir :

- le bouclage des flux de matières (circulariser) ;
- la minimalisation des pertes par dissipation (étanchéifier) ;
- la dématérialisation (intensifier) ;
- la décarbonisation du système énergétique (équilibrer).

Dans cette perspective, un simulateur d'ECA fournit ainsi des opportunités de recherches dans chacun des axes mentionnés ci-dessus de l'écosystème industriel et en particulier pour l'étude détaillée :

- des enjeux du recyclage intégral et de la valorisation systématique des déchets et des coproduits de l'ECA conduisant à une fermeture quasi totale de leur cycle. Ce sujet sera traité au §7.4 sur les systèmes de recyclage hautement efficaces et correspond à la dimension « bouclage des flux de matières » de l'écologie industrielle ;
- de la problématique des micropolluants et de la bioaccumulation au sein de systèmes clos vivants, domaine qui se rapporte à l'écotoxicologie. Ces thématiques seront discutées au §7.3.3 sur la biosurveillance de l'exposome, et sont associées avec la dimension « minimalisation des pertes par dissipation » de l'écologie industrielle ;
- de l'exploitation opérationnelle hautement efficace des ECA, via des infrastructures, des instrumentations, des équipements et un hardware extrêmement légers, miniaturisés ou avec des

matériaux conçus de sorte à optimiser l'utilisation des ressources, c'est-à-dire à minimiser les flux totaux de matières et d'énergie, tout en assurant des services équivalents (plus de services avec moins de matières et/ou d'énergie) ;

- de la valorisation du dioxyde de carbone et de la biomasse, mais aussi de la production et l'utilisation d'énergies renouvelables, de l'efficacité énergétique, ainsi que de la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, des éléments qui sont passés en revue au §7.4.3 et sur la valorisation du CO₂ au §7.4.4 sur le bioraffinage. Ils sont en lien avec l'axe « décarbonisation » de l'écologie industrielle.

7.2.3 Un vecteur pour le développement d'analyse de flux de matières dynamiques

L'analyse de flux de matières (« material flow analysis » ou « MFA » en anglais) est la méthodologie de base en écologie industrielle (voir §6.2.1). Le simulateur d'ECA pourrait aider à consolider les aspects suivants de la recherche sur le « métabolisme industriel » (Erkman & Chèvre 2006) :

- L'acquisition de données et monitoring de l'ECA :
 - amélioration des méthodologies de MFA, notamment pour l'acquisition et la gestion instantanée de grandes quantités de données générées par la circulation et les échanges de flux de matières et d'énergie au sein de systèmes complexes (voir §9.3.2 sur le « data mining ») ;
 - harmonisation et standardisation de données hétérogènes afin de pouvoir les traiter en bloc et les agréger (idem, voir le §9.3.2) ;
 - suivi quasiment instantané du fonctionnement normal de l'ECA et de ses compartiments (ce qui y pénètre, ce qu'ils contiennent et stockent, ce qui en sort) (voir le §7.3.3 sur le suivi de l'exposome et le §8.2 sur la biosurveillance de la santé des organismes) ;
- Analyse des données :
 - développement d'un outil opérationnel pour la gestion durable des ressources dans l'économie réelle à différentes échelles : au niveau de procédés, d'entreprises, de territoires, de régions, etc. (§7.2.6) ;
 - interprétation des données amenant une réelle valeur ajoutée.
- Systèmes de mesures :
 - identification des caractéristiques cruciales de l'ECA ;
 - identification des données qu'il est vraiment pertinent de mesurer (quels sont les éléments minimaux à mesurer ?), afin de pouvoir comprendre de manière détaillée le système et sa dynamique (§7.2.6).
- Modélisation :
 - développement d'une méthodologie de « MFA dynamique », capable de modéliser et

d'anticiper les fluctuations de flux de matières et d'énergie ainsi que les variations de stocks au sein de l'ECA (actuellement, les études de MFA sont majoritairement statiques).

7.2.4 Un laboratoire pour le test, la modélisation et le développement de réseaux alimentaires « industriels »

La conception et la compréhension de réseaux éco-industriels sont des éléments centraux de la recherche dans le domaine de l'écologie industrielle. Au sein des écosystèmes naturels, certaines espèces se nourrissent des déchets ou des organismes d'autres espèces. Par analogie, les ECA s'en inspirent et développent des écotecnologies basées sur des procédés biochimiques de valorisation des déchets produits par les différents compartiments du système. De tels processus pourraient être ensuite répliqués à l'échelle industrielle, permettant l'identification et le design de nouvelles « chaînes alimentaires industrielles ». Ce type de développements technologiques pourraient être valorisés à plus large échelle, en renforçant par exemple le déploiement des synergies éco-industrielles, dont l'objectif est la valorisation des déchets, des co-produits et sous-produits des entreprises (déchets métalliques, gypse, solvants, mais aussi des flux propres aux ECA comme la biomasse, l'eau, etc.), par des échanges mutuels entre acteurs économiques. En fin de compte, il s'agit par exemple de substituer un flux entrant par un flux sortant ou de « circulariser » les chaînes d'approvisionnement. Mais, au-delà des exemples de symbioses industrielles (voir §6.2.2), il est nécessaire de mieux appréhender et modéliser les réseaux alimentaires « industriels » en général. Dans cette perspective, un simulateur d'ECA pourrait bien représenter un outil expérimental tout à fait pertinent. Le démonstrateur pourrait ainsi s'intéresser à la problématique des conditions nécessaires pour favoriser une « économie circulaire » viable, ou du moins le design d'une économie la plus circulaire possible. Il s'agirait donc de déployer une recherche approfondie sur les moyens permettant de mesurer, monitorer, modéliser, anticiper et surtout gérer les flux de matières et d'énergie, de manière à recréer un ECA durable. Il s'agit de démontrer la faisabilité du traitement de déchets en conditions réelles – difficiles à simuler (d'un point de vue statique) – en présence de consommateurs réels (d'un point de vue dynamique). Ceci inclut la recherche sur la régulation fine des boucles métaboliques (§7.3 sur le pilotage fin conditions écosystémiques) et les limites du recyclage (§7.4 sur le recyclage intégral) (Erkman & Chèvre 2006). Il peut également s'agir de la quantification des besoins en consommables pour de telles missions, c'est-à-dire pour le maintien de la santé et du bien-être de l'équipage (comme l'intensité matérielle nécessaire à son alimentation (§7.2.5), ou le coût énergétique qui s'y rapporte, etc.). Ce système de recyclage constitue une réponse, du moins partielle (et en l'occurrence littérale), à une question posée par Robert Frosch: « Quel serait l'équivalent industriel des organismes décomposeurs? ». Dans les écosystèmes biologiques, la fonction de recyclage s'opère essentiellement grâce aux micro-organismes décomposeurs, dont le métabolisme

dégrade les substances jusqu'au niveau élémentaire des atomes et des molécules. Les micro-organismes d'un ECA, génétiquement modifié ou pas, constituent une première possibilité (Erkman 2004). D'ailleurs et de manière générale, il pourrait s'avérer également approprié pour la recherche en écologie « traditionnelle », et en particulier pour l'étude des interactions entre organismes, leurs habitats et leur environnement (voir §7.3.1 sur le perfectionnement de notre savoir les écosystèmes) et pour la biologie synthétique en général (§8.2.8).

En résumé, l'étude du fonctionnement et de la gestion d'un écosystème hybride tel qu'un ECA semble à même de permettre la modélisation, le test et la régulation de chaînes alimentaires et de réseaux trophiques tant naturels qu'industriels.

7.2.5 Un moteur du perfectionnement de l'évaluation des impacts (méthodologie de l'analyse de cycle de vie)

Le métabolisme industriel offre essentiellement une description quantitative des ressources matérielles traversant, s'accumulant ou circulant au sein d'un système donné. Cependant, une MFA ne donne aucune information au sujet des impacts de l'utilisation de ces ressources. La méthodologie de l'analyse de cycle de vie (ACV, et en anglais « life cycle analysis » ou « LCA »), cherche précisément à évaluer les divers effets sur l'environnement, et sur la santé humaine, de la consommation de ressources tout au long du cycle de vie d'un produit, d'une activité ou d'un service. À nouveau, une recherche fondamentale est nécessaire pour affiner les fondements conceptuels d'une ACV et la compréhension des impacts, en confrontant les données expérimentales, les hypothèses théoriques, les données acquises, validées et interprétées, et la modélisation dynamique.

Parallèlement à la recherche sur les MFA, un simulateur d'ECA offrirait des opportunités de recherche appropriées pour perfectionner les méthodologies d'évaluation des impacts, en particulier dans le cadre de la production agroalimentaire. De manière générale, les études ACV complètes sont effectuées dans une perspective « cradle-to-grave » (soit du berceau à la tombe). Toutefois, de nombreuses études ACV dans le domaine agroalimentaire se focalisent uniquement sur une étape particulière du cycle de vie, comme l'agriculture, les processus industriels de transformation, le transport, l'emballage, le traitement des déchets (Sonesson et al. 2005). Ou alors, il s'agit d'études ACV partielles « cradle-to-gate » (du berceau à la porte) ou « cradle-to-retail » (du berceau à la vente au détail) qui concluent souvent que le potentiel d'eutrophisation est dominé par l'impact de l'étape de culture des aliments. Or, les transformations biochimiques liées à la métabolisation de la nourriture par le corps humain donnent naissance à différents polluants qui sont relâchés dans l'air et dans l'eau. Ceux-ci devraient être inclus dans les limites du système d'une ACV alimentaire, de la même manière que les déchets organiques sont traités lorsqu'ils sont mis en décharge ou compostés. Les méthodes d'évaluation environnementale, dotées d'une approche « cradle-to-cradle », intègrent précisément le potentiel d'eutrophisation et

seraient particulièrement intéressantes à optimiser sur les écosystèmes clos. Un article du *Journal of Industrial Ecology* décrit par exemple un modèle simple, permettant d'inclure les excréments humains dans l'analyse de cycle de vie des produits alimentaires (Tito et al. 2013; Muñoz et al. 2008). Il en ressort que les émissions dérivées de la digestion de la nourriture, et celles liées à l'excrétion des déchets organiques, sont pertinentes, voire significatives, dans une perspective cycle de vie, et qu'elles ne devraient pas être exclues des études ACV. Basés sur une approche de métabolisme industriel, de tels modèles permettent d'allouer et d'inclure ces émissions dans l'écobilan d'une sélection d'aliments. Ils requièrent donc des informations de base sur la composition des aliments et calculent les bilans de masse et d'énergie du carbone, de l'eau, des nutriments comme l'azote, le phosphore, et d'autres composants inorganiques dans les diverses voies d'excrétion (la respiration, les fèces et l'urine). Les flux de matières et d'énergie auxiliaires liés à l'utilisation de toilettes sont inclus, comme l'impact de la chasse d'eau, du lavage et du séchage des mains. Le traitement des eaux usées est également intégré (composition des effluents). Les résultats montrent une sensibilité du modèle à la composition de la nourriture et son utilité pour l'évaluation de l'impact environnemental d'un changement de régime. Dans une perspective cycle de vie, les résultats montrent que les émissions liées à la « postconsommation » des aliments peuvent dominer les impacts sur le potentiel d'eutrophisation. Ceci démontre que le cycle du carbone est bouclé avec les émissions humaines et donc, après la préparation et la consommation de la nourriture. La digestion ou l'excrétion sont clairement pertinentes quand l'objectif est d'équilibrer les bilans de masse dans le cycle de vie ou afin de comparer les effets environnementaux de différents régimes alimentaires, au vu de la dépendance de composition de la nourriture sur les émissions issues des excréments. Un simulateur d'ECA concentre tous ces aspects puisque le potentiel d'eutrophisation des nutriments consommés par l'équipage, impacte directement les cultures végétales de l'ECA, celles-là mêmes qui produisent des aliments à partir des excréments, de l'urine et du CO₂ de l'équipage. Les recherches futures dans un démonstrateur d'ECA offrent ainsi la possibilité :

- de modéliser les paramètres sur l'alimentation (contenu exact en glucides, en cholestérol, en amidon, en fibres, etc.) ;
- d'intégrer dans de tel modèle les micropolluants et autres composés organiques toxiques, comme les pesticides ;
- d'analyser les flux de matières ou de substances afin d'équilibrer les bilans de C, N, P et autres éléments présents dans la nourriture ;
- de distinguer l'impact lié à des teneurs protéiniques en azote différentes (protéines végétales vs protéines animales) ;
- de clarifier l'importance de l'étape d'excrétion pour une palette de produits alimentaires.

Il s'agit d'un exemple d'outil de l'écologie industrielle transférable aux méthodologies propres aux écosystèmes naturels. Ces résultats sont également pertinents pour la recherche en nutrition (voir §8.3).

Russes et américains se sont également intéressés aux bilans carbone des ECA, en particulier des effets du bouclage du système, sur la gestion des déchets et sur l'index de récolte (Sychev et al. 2003; Wheeler 2003; Gurevich et al. 2008). Les expériences effectuées ont visé à comparer les flux de CO₂, d'O₂, et de biomasse (CH₂O) dans les systèmes de support-vie biologiques. Le développement de systèmes totalement clos avec oxydation des déchets organiques ou production de nourriture à partir des déchets organiques, permet d'envisager la diminution de la surface dédiée à la culture des plantes, ainsi que le stockage de la biomasse non comestible pour valorisation ultérieure. Les approches MFA et ACV permettent par exemple de démontrer que l'oxydation par digestion aérobie ou par incinération (pour la production d'énergie) présente le désavantage de consommer l'oxygène utile pour le LSS. En effet, si dans les deux cas, on a la possibilité de réapprovisionner les plantes en CO₂, ce n'est nécessaire que si le système est hautement clos pour la nourriture. Mais pour un système partiellement clos, et dans lequel une partie de la nourriture est cultivée et l'autre importée, le CO₂ provenant de l'oxydation des déchets, additionné à celui provenant de la respiration de l'équipage et des micro-organismes peut excéder la capacité d'absorption par les plantes. De plus, il peut favoriser la consommation de l'O₂ produit par la photosynthèse, dont la disponibilité pour l'équipage serait ainsi réduite (Wheeler 2003).

Pour des systèmes partiellement clos, le programme Oïkosmos semble ainsi pertinent pour identifier, tester et optimiser des procédures alternatives et plus appropriées aux processus d'oxydation des déchets, afin de stocker la biomasse, puis de la valoriser par exemple via :

- la production de consommables : blocs comprimés (servant de support à la germination et à la croissance des graines), papier, panneaux agglomérés (avec utilisation éventuelle de composés organiques volatils pour le collage), fertilisants, etc. ;
- la production de sols, par compostage et incorporation à du régolithe pour une future utilisation en tant que sol pour la culture des plantes et comme puits de carbone pour les systèmes ouverts (voir également le §7.4.3.4 sur les ECA avec apport externe de CO₂) ;
- la production d'arbres ligneux, comme des arbres fruitiers nains (< 1 mètre en 2-3 ans de production, ex : pommiers) pour la production de bois (de l'ordre de 1 kg m⁻² an⁻¹).

En résumé, l'étude des ECA présente globalement un intérêt pour :

- affiner les concepts et perfectionner les méthodologies de l'ACV, afin d'améliorer l'évaluation des effets sur l'environnement et sur la santé humaine de la consommation de ressources tout au long du cycle de vie d'un produit, d'une activité ou d'un service ;
- établir une ACV à l'échelle d'un écosystème miniaturisé, dans lequel les cycles biogéochimiques sont accélérés ;
- mesurer les impacts *réels* du fonctionnement de l'ECA (en particulier la production agroalimentaire), et non pas uniquement les impacts *potentiels* comme c'est souvent le cas dans

les études ACV traditionnels qui prédisent des impacts ou les extrapolent, mais sans les mesurer et vérifier concrètement ;

- harmoniser l'acquisition et le traitement des données issues des différentes méthodes de l'écologie industrielle, afin de favoriser leur utilisation conjointe et d'assurer leur compatibilité.

7.2.6 Un support pour le développement de la notion de durabilité systémique

La recherche dans le simulateur pourrait s'avérer utile pour mieux définir la notion de « durabilité systémique ». En particulier en cherchant à répondre – dans un contexte empirique inédit – à la question suivante : « Qu'est-ce que la durabilité ? » Ou encore : « Comment peut-on caractériser l'utilisation durable d'une ressource durant une période donnée ? » (Erkman & Chèvre 2006). Cette question a été traitée à l'échelle d'un territoire dans le cadre d'une thèse, dans le groupe Écologie Industrielle de l'UNIL (Suomalainen 2012), mais la question reste encore ouverte à l'échelle d'un écosystème clos de la taille de MELiSSA. Dans ce contexte, une plateforme expérimentale comme un simulateur d'ECA pourrait permettre la consolidation empirique et théorique de ce concept, ainsi que sa modélisation et son test. Dans l'optique d'analyser la durabilité de l'utilisation d'une ressource, Suomalainen (2012) a proposé des indicateurs pour caractériser les BLSS. Ils portent sur 1) la charge totale du système en termes de matière et d'énergie, 2) l'efficacité du recyclage et de l'utilisation matérielle (pour comparer des systèmes de dimensions différentes), 3) la couverture temporelle (indicateurs dynamiques) et sur 4) des indicateurs d'intensité de ressources et de déchets (exprimant les quantités de ressources nécessaires et les déchets créés).

Il s'agirait alors d'examiner de manière périodique, systématique et ciblée la performance des ECA. La définition des indicateurs pour l'évaluation de durabilité et son suivi dans le temps serait ensuite nécessaire, afin de pouvoir catalyser l'amélioration continue de sa performance. Les organismes de l'ECA formeraient alors ensemble un modèle de « système durable » idéal, capable de maintenir sa survie et son organisation loin de son équilibre thermodynamique (Ho & Ulanowicz 2005).

À terme, un simulateur d'ECA devrait d'ailleurs disposer d'un référentiel d'évaluation global, basé sur des critères adéquats, permettant de quantifier les effets concrets des mesures et des recommandations émises par les partenaires du projet sur l'amélioration de la performance (opérationnelle, environnementale, énergétique, technologique, etc.) des activités de l'installation.

7.3 Le pilotage fin des conditions écosystémiques

Un simulateur d'ECA et d'habitat clos est une infrastructure pertinente pour le pilotage fin et l'optimisation des conditions écosystémiques. Dans cette perspective, il se profile comme :

- un instrument de perfectionnement de notre savoir sur les écosystèmes (§7.3.1) ;
- un optimiseur de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs (§7.3.2) ;
- une plateforme expérimentale de biosurveillance de l'exposome (§7.3.3) ;
- un régulateur de l'homéostasie des organismes et de leur écosystème (§7.3.4).

7.3.1 Un instrument de perfectionnement de notre savoir sur les écosystèmes

Un démonstrateur d'ECA peut être considéré comme une plateforme expérimentale de choix pour l'étude descriptive et dynamique des organismes, de leur physiologie, de leur écologie fonctionnelle. Il s'agit donc d'un véritable instrument de perfectionnement de notre savoir sur les écosystèmes, grâce aux opportunités qu'il offre en terme :

- de suivi quasi en temps réel de cycles biogéochimiques accélérés (§7.3.1.1) ;
- de fonctionnement à une échelle spatiale de complexité « méso » (§7.3.1.2) ;
- d'observation d'interactions aux interfaces « organisme - habitat - environnement » (§7.3.1.3) ;
- d'exploration et de test des principes du biomimétisme en conditions extrêmes (§7.3.1.4).

En parallèle, bien d'autres thématiques et sujets de recherche liés à l'écologie scientifique sont envisageables, allant de la régulation de réseaux alimentaires (§7.2.4), au renforcement des capacités d'adaptation aux changements des conditions écosystémiques (§7.3.4.3), en passant par l'étude des phénomènes de bioaccumulation de micropolluants (§7.3.3.2.d). L'installation intégrant un écosystème artificiel permettrait également de contrôler l'évolution des organismes, notamment de communautés microbiennes, ainsi que de végétaux, et bien sûr de l'homme, par l'intermédiaire des outils provenant des sciences omiques (§8).

7.3.1.1 *Le suivi quasi en temps réel de cycles biogéochimiques accélérés*

Dans l'optique d'un maintien de l'homéostasie de l'ECA (§7.3.4.3.a), un pilotage fin des conditions écosystémiques est nécessaire. La mise en place adéquate des processus de biosurveillance (aussi bien de l'environnement que de la santé des organismes) permet une gestion réactive de l'ECA.

Une surveillance attentive facilite l'optimisation du fonctionnement de l'ECA, offre un meilleur contrôle

de la stabilité de l'écosystème et assure une maîtrise des risques biologiques et chimiques (§7.3.3.1)

L'objectif étant de détecter de manière quasi instantanée les effets de variations volontaires de paramétrage, ou les de changements imprévus des conditions environnementales, et de réduire les temps de réponse.

Un pilotage fin de l'ECA implique de pouvoir paramétrer ses conditions écosystémiques quasiment en temps réel. Par exemple, une telle optimisation continue des conditions de culture permet à la croissance des plantes de se dérouler à un rythme soutenu, avec des temps de génération les plus réduits possibles. Il s'agit également de contrôler exactement les flux de déchets et les produits sortants, en jouant notamment sur des conditions comme la température, l'acidité, etc.

Le démonstrateur peut alors être considéré comme un laboratoire miniaturisé accélérant significativement cycles biologiques et biochimiques. Aux échelles temporelles habituelles des cycles biogéochimiques de la Biosphère, un simple cycle peut durer plusieurs années et jusqu'à des dizaines d'années – pour certains « circuits écosystémiques » – dans l'environnement naturel. C'est par exemple le cas pour les cycles de l'eau, du carbone ou de l'azote ou encore ceux d'éléments inorganiques. Par contre, au sein d'un ECA, les éléments peuvent effectuer une boucle en quelques heures ou jours seulement. Le design d'un ECA cherche à réduire les interfaces entre compartiments en canalisant précisément les flux de matière, ce qui accélère la durée de leurs cycles. En comparaison avec les écosystèmes naturels, cette particularité permet aux ECA d'effectuer un nombre élevé de cycles d'éléments, et par conséquent de génération de plantes lors des campagnes d'expérimentation. Ainsi, la régulation et l'accélération des cycles biogéochimiques à l'échelle réduite d'un ECA se révèle intéressante pour la recherche en biogéosciences (§7.3.1.3).

7.3.1.2 Le fonctionnement à une échelle « méso » de complexité

La faible biodiversité des ECA ne les empêche pas d'opérer à une échelle spatiale relativement complexe, que l'on peut qualifier de « méso ». L'affixe « méso- » signifie que la taille des ECA est « intermédiaire » ou moyenne, c'est-à-dire à mi-chemin entre :

✧ l'échelle spatiale hiérarchique inférieure correspondant à l'étude de « microcosmes », échelle à laquelle s'effectue la majorité des manipulations en laboratoire liées à la biologie moléculaire et cellulaire. Par exemple, les volumes pour des expérimentations d'hybridations moléculaires (puces à ADN), sont de l'ordre de quelques microlitres. Quant aux cultures bactériennes, elles baignent dans des solutions nutritives allant de quelques millilitres à quelques litres. Les chambres de cultures ont souvent de faibles surfaces (< 1 m² à quelques m²) et les échantillons de sols sont souvent consisté de quelques décimètres cubes.

- Ses avantages sont : de faibles coûts d'exploitation ; des conditions simplifiées ; une bonne

maîtrise des conditions du milieu ; une bonne répliquabilité des expériences ; des expériences se déroulant généralement sur de courtes périodes ; un suivi facilité de l'évaluation des micro-organismes ou des organismes végétaux.

- Ses défauts sont : des tests effectués parfois uniquement sur une espèce ; de faibles interactions inter-espèces ; un faible potentiel pour une approche (éco) systémique, l'approche réductionniste lui étant privilégiée ; des conditions artificielles ; une faible résilience en cas de perturbations (peu d'effets tampons) ; un ratio volume/débit élevé.

◇ l'échelle hiérarchique supérieure - concerne les « macrocosmes » et permet l'étude d'écosystèmes ou de populations d'organismes évoluant dans un milieu comparable à leur environnement naturel.

- Ses avantages sont : des conditions proches de la réalité (meilleur réalisme) ; des limites moins bien définies ; la possibilité d'étudier les relations d'un certain nombre d'interactions inter-espèces, mais toutefois plus limitée lorsqu'il s'agit de relations entre micro-organisme et espèces végétales ; une bonne résilience du milieu.
- Ses défauts sont : des coûts d'expérimentations plus élevés ; une durée plus longue des expériences ; une forte complexité (nombre d'espèce, taille et volume plus élevés, etc.) ; un paramétrage et un contrôle limité des conditions environnementales du milieu ; une faible maîtrise des entrées et sorties ; une difficulté à tracer les éléments (métabolisme des flux de matières) ; une modélisation dotée d'une précision plus faible.

À la lumière des éléments ci-dessus, un ECA peut dès lors être considéré comme un « mésocosme », caractérisé quant à lui par :

- un confinement élevé ;
- une taille moyenne : largement plus grand qu'un tube à essai, bien plus petite que la plupart des écosystèmes naturels ;
- la possibilité d'effectuer des expérimentations à court, moyen et long terme ;
- des limites mieux définies en termes de frontières spatiales ;
- un degré élevé de maîtrise des entrées et sorties ;
- un haut niveau de contrôle qui permet à l'expérimentateur de varier à sa guise tout ou partie des paramètres du milieu (humidité relative, température, pression, concentration de CO₂, présence de polluants, etc.) ;
- une biodiversité faible à intermédiaire, composée de nombreux types d'organismes (homme, micro-organismes et plantes supérieures) sur de multiples niveaux trophiques ;
- au couplage des organismes qui interagissent grâce une interconnexion fortement contrôlée des flux entre les compartiments ;

- de nombreux capteurs et équipements pour suivre et influencer les paramètres essentiels.

La modélisation et le pilotage d'un écosystème à une échelle « méso » a l'avantage de faciliter le suivi des molécules (comme des éléments inorganiques tels que le phosphore, des contaminants dans les eaux, etc.) tout au long de leurs cycles. Ce traçage de leur parcours au sein des différents compartiments, canalisations et installations, équipements de traitement et de production, s'effectue sur de longues durées et sur un grand nombre de cycles. La taille limitée des zones tampons nécessite quant à elle un dimensionnement adéquat, afin d'assurer une fiabilité à long terme.

En résumé, un simulateur d'ECA fournit des conditions expérimentales relativement proches de la réalité des écosystèmes naturels (les macrocosmes), mais à des coûts potentiellement moins élevés (si l'on excepte les coûts liés au développement et à la construction de l'installation elle-même) et des expériences plus courtes, à l'image de celles effectuées dans les microcosmes. Les ECA réduisent donc la complexité naturelle de par leur « encapsulation ». S'ils manifestent néanmoins encore une abondante complexité, notamment de par la quantité très élevée de données générées lors de son monitoring (voir le §9.3.2 sur le « Big data » générés par les ECA), celle-ci est plus facilement appréhendable par les expérimentateurs. L'étude des ECA offre une opportunité unique de pouvoir combler le fossé entre prédiction et observation, au sein d'un écosystème « recréé ». Il est par exemple possible d'y observer l'effet de biocides sur plusieurs catégories d'espèces (voir §7.3.3.2.b) dans un contexte expérimental plus réaliste que dans les conditions habituelles de laboratoire.

7.3.1.3 L'observation d'interactions aux interfaces « organisme - habitat - environnement »

Certaines méthodes classiques de la microbiologie ne sont pas suffisantes pour étudier tous les aspects d'écosystèmes pollués, par exemple pour l'évaluation des capacités métaboliques de biodégradation de populations microbiennes du sol et leurs interactions avec les polluants en présence, du fait de l'extrême complexité de l'écologie microbienne *in vivo*.

Or, de par l'interconnexion étroite de l'ensemble des systèmes de ressources circulant dans le simulateur d'ECA, ce dernier représente un cadre d'étude sans équivalent pour effectuer une recherche à l'interface des nexus de ressources minérales, organiques, hydriques, alimentaires ou énergétiques. Certes les expérimentations d'écologie microbienne se déroule *in vitro*, mais à une échelle de complexité méso comme on l'a vu au §7.3.1.2. En outre, ce simulateur constitue une plateforme pour l'analyse approfondie des interactions aux interfaces « organisme - habitat - environnement » au sein d'écosystèmes, à savoir des interrelations :

- entre les organismes et l'environnement intérieur de l'ECA (par exemple l'interaction micro-

organisme - milieu interne du (photo)bioréacteur) ;

- entre les organismes et l'environnement intérieur de l'habitat clos (interaction homme - milieu ambiant de l'habitat) ;
- entre les organismes et l'environnement extérieur de l'habitat (interaction organisme - milieu externe) ;
- entre les organismes d'espèces distinctes (interactions interspécifiques entre l'homme et une espèce de plante, ou celles entre les micro-organismes d'un consortium bactérien) ;
- au sein d'une population d'individus pour une espèce d'organisme donnée (interactions intraspécifiques entre les plantes d'une culture végétale, ou celles entre les cyanobactéries au sein d'un photobioréacteur).

Concrètement, il devient possible grâce aux ECA d'observer méticuleusement les effets de l'introduction d'échantillons d'écosystèmes prélevés dans la nature (aquatiques ou terrestres). Dans cette optique, un démonstrateur d'ECA pourrait s'avérer être un support judicieux pour effectuer des études de « biogéosciences », et en particulier celles portant sur les processus et les mécanismes contrôlant les cycles biogéochimiques dans les écosystèmes naturels. En effet, les micro-organismes permettant le fonctionnement des BLSS font partie intégrante des cycles géomicrobiens propres sur Terre (Hendrickx & Mergeay 2007). Il s'agirait par exemple d'investiguer l'influence des organismes vivants sur la biogéochimie de la Biosphère et de l'environnement. À titre d'exemple, les ECA pourraient intégrer momentanément de nouveaux compartiments à la « boucle écosystémique », à l'image de microcosmes composés d'extraits de sols et dotés d'un volume typiquement de l'ordre de quelques dizaines de cm³. De cette manière, le programme Oïkosmos permettrait d'envisager des interactions « eau - sol - plantes - atmosphère » pour les thématiques et les sujets de recherche suivants :

1. L'étude des relations entre les plantes, les bactéries, les champignons et/ou leur milieu (écologie microbienne du sol, biologie des sols, etc.), par exemple via :

- l'étude des interactions entre végétaux et micro-organismes :
 - modélisation et détermination de l'impact des populations microbiennes sur les plantes supérieures cultivées : sur le cycle des nutriments, les échanges gazeux la productivité, etc.) (Pisman et al. 1998) ;
 - développement de techniques et de protocoles pour la gestion des microbes dans le compartiment des plantes supérieures ;
 - étude de dynamique de la végétation ;
 - évaluation du potentiel de rhizobactéries pour la bioremédiation, en parallèle à leur effet bénéfique pour la croissance et la santé des plantes (Zhuang et al. 2007).
- des investigations de géomicrobiologie : développement de techniques permettant de cibler des

composants spécifiques de systèmes biogéochimiques complexes à différentes échelles spatiales :

- microbiologie : isolation et caractérisation de micro-organismes d'échantillon ;
- biologie moléculaire : étude de l'expression des gènes et des voies bactériennes de réduction des métaux ;
- chimie des protéines : identification et caractérisation de protéines bactériennes ;
- caractérisation de processus géomicrobiologique :
 - évaluation du rôle des protéines bactériennes et des exopolysaccharides dans 1) la détermination de la structure, 2) de la taille, 3) de la composition et 4) des mécanismes de formation de particules et de minéraux biogéniques potentiellement présents ou introduits dans l'ECA ;
 - analyse des effets des organismes sur les processus de déminéralisation ou de biominéralisation ;
 - suivi des processus de contamination des sols ;
 - étude des interactions entre les bactéries et les métaux ;
 - analyse des voies de catalyse des processus rédox impliquées dans les processus de transformation de métaux toxiques et solubles en une forme insoluble (afin de limiter leur « mobilité » dans le milieu).
 - identification de nouvelles voies bactériennes.
- autres investigations via des techniques de microscopie électronique et de spectroscopie.

2. L'étude de microcosmes variés, après avoir effectué des modifications ciblées de leur contenu :

- l'observation des effets de l'intégration ou du retrait d'éléments de la boucle de flux de matières de l'ECA comme des molécules ou des ions du complexe argilo-humique, des bactéries, des invertébrés, des particules fines ou encore des poussières, selon les conditions environnementales en présence ;
- l'étude des premières étapes de formation des matières organiques du sol : pour le cycle d'éléments comme le carbone, l'azote et le phosphore ou pour celui d'éléments en traces, de métaux lourds, de métalloïdes, ainsi que ceux d'acides organiques de faibles poids moléculaires du sol (par exemple issus de la voie oxalotrophique) ;
- le suivi des procédés et des phénomènes de compartimentation, de dilution, d'assimilation, d'accumulation, de précipitation, etc. ;
- le suivi de la production bactérienne de matières organiques cationiques (polysaccharides) ;
- la mesure du temps de résidence des éléments dans les différents compartiments ;
- la mesure des changements de concentrations d'isotopes dans les différents composants de l'écosystème (géochimie d'isotope) ;

- l'évaluation de l'intérêt et du potentiel du couplage de cultures hydroponiques avec des cultures basées sur des sols artificiels ;
- l'élaboration d'humus à partir de plantes en décomposition (riches en fibres lignocellulosiques) ;
- l'étude du rôle des communautés microbiennes impliquées dans les processus de décomposition de la biomasse d'un microcosme (McGuire & Treseder 2010) ou dans ceux de purification de l'air et de traitement de l'eau (Nelson & Wolverton 2011) ;
- l'estimation des réserves à moyen terme d'azotes protéiques nécessaires en cas de manque d'ions d'azote dans la solution aqueuse.

3. L'approfondissement de la compréhension des réponses des écosystèmes aux changements climatiques et de leur impact sur les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère de l'ECA :

- l'intégration de la biologie aux modèles d'étude du réchauffement climatique, qui traite majoritairement d'aspects physiques (à l'image des objectifs de projets de « superlaboratoires » comme le Biotron pour la recherche en BLSS sur les micro-organismes, les insectes et les plantes²²⁷) ;
- l'étude du potentiel de capture et de stockage de carbone : détermination de la capacité de sols artificiels ou de solutions hydroponiques à constituer des puits de carbone.

De plus, un simulateur d'ECA pourrait bien représenter un instrument original pour développer et consolider de nouvelles approches de gestion des écosystèmes, comme par exemple investiguer le rôle potentiel de l'écologie fonctionnelle (Caron-Lormier et al. 2009) permettant :

- de modéliser et de suivre l'évolution des fonctions et des rôles joués par les espèces d'un écosystème donné, selon son alimentation et les événements qui se sont déroulés dans leurs vies, les variations l'exposome (§7.3.3.1.a) et les perturbations associées, et les effets de ces expositions tant au niveau du génotype que du phénotype (§8.2) ;
- d'analyser collectivement des communautés écologiques en établissant le « métagénome » des organismes de l'ECA, via la combinaison des données omiques à l'échelle de l'écosystème (§8.3.3.1). La poursuite d'étude de ce type, à l'échelle des « systèmes de molécules » associés aux organismes évoluant de l'écosystème, donne en retour la possibilité d'améliorer les méthodologies et les outils de suivi des processus de coévolution et des mécanismes sous-jacents en jeu (§8.3.2.1) ;

²²⁷ Le Biotron est un laboratoire de recherche canadien inauguré en 2008, conjointement entre l'Université de Guelph et The University of Western Ontario: <http://www.thebiotron.ca>

- d'évaluer l'effet de manipulation de la biodiversité au sein des ECA (§7.3.4).

7.3.1.4 *L'exploration et le test des principes du biomimétisme en conditions extrêmes*

L'argument souvent avancé par les « aficionados » du biomimétisme est que seule la « vie », grâce à son expérience acquise dans fermeture des cycles de flux de matières tout au long son évolution, est à même d'accomplir toutes les transformations nécessaires pour un recyclage des macro- et des micronutriments.

L'approche biomimétique introduite au §5.1.3.2 s'intéresse principalement au bénéfice des 3,8 milliards d'années de R&D intensive effectuées par la Biosphère, qui a permis aux organismes qui la composent de s'adapter à un environnement en constant changement. Parmi ces êtres vivants figurent nombre d'espèces « championnes », susceptibles de nous inspirer tant au niveau de leur forme, des leurs procédés de fabrication (en considérant les organismes comme des « ingénieurs » (Jones et al. 1994)), que des interactions intra- et/ou inter-spécifiques qu'elles réalisent au sein des écosystèmes naturels (Smil 2002). Le célèbre « velcro » est un des exemples par excellence de biomimétisme. Il reproduit la forme de crochet du fruit de la bardane²²⁸, qui lui permet à des structures telles que les mailles d'un tissu. Ces propriétés « auto-agrippantes » s'est généralisée depuis la fin des années cinquante pour devenir quasi ubiquitaire, aussi bien dans l'industrie textile et les vêtements, portés au quotidien par tout un chacun, que dans l'aérospatial, comme le démontre l'emploi abondant de bandes velcro par les astronautes pour fixer leurs équipements et leurs objets personnels en apensateur. On n'a pas trouvé mieux depuis les premières missions Appolo ! Outre cette fameuse illustration, de nombreux produits et applications résultent d'une démarche de bioinspiration, à l'image du développement :

- de colles synthétiques inspirées des propriétés adhésives de molécules produites par les mollusques (Benyus 1997) ;
- de la production d'hydrogène (Pool et al. 2012) ou d'électricité imitant la photosynthèse (Tributsch & Calvin 1971; Burschka et al. 2013) ;
- de nanomembranes bioniques jouant le rôle de détecteurs de radiations électromagnétiques (inspirées des membranes cellulaires) (Matovic & Jakšić 2011) ;
- de turboréacteurs copiant la forme du nautilaire (Westermann et al. 2004) ;
- de fenêtres autonettoyantes reproduisant l'« effet lotus » (Neinhuis & Barthlott 1997) ;
- d'éco-habitats performants énergétiquement imitant l'architecture des termitières (Elmahdi

²²⁸ Lire l'article de Thomas Stephens, « How a Swiss invention hooked the world » paru le 01.2007 sur SwissInfo.ch : www.swissinfo.ch/eng/archive/How_a_Swiss_invention_hooked_the_world.html?cid=5653568

2008) ;

- de microrobots marchant sur l'eau, inspirés des propriétés hydrophobes des poils des pattes d'insectes comme les gerris (punaises d'eau) (Stimson Wilcox & Stefano 1991).

Dans son ouvrage de référence sur le biomimétisme – « Biomimicry » –, Janine Benyus décrit sa vision des principes régissant le fonctionnement de la Biosphère, qu'elle appelle les « leçons de la Nature » (Benyus 1997). Or, le développement des ECA émane par essence d'une démarche sur bioinspiration. Quel autre laboratoire qu'un simulateur d'ECA serait mieux à même de tester ces principes à l'échelle d'un écosystème reconstitué par l'homme ?

Afin d'apporter des éléments de réponse à cette question, une analyse succincte de l'application de ces concepts aux ECA est présentée ci-après. Il s'agit des « leçons de la Nature » suivantes :

✧ « La Nature utilise l'énergie solaire ». Ce n'est pas vraiment le cas pour des ECA comme MELiSSA, dont les cultures de plantes et de micro-algues reposent encore essentiellement sur une illumination artificielle, mais cela pourrait bien ne plus l'être à terme, dans le cadre du développement de serres artificielles pour une base martienne. Le chapitre §10.4 traite des aspects liés à l'éclairage artificiel et le §8.3.1.2 des conditions de cultures des plantes.

✧ « La Nature n'utilise que la quantité d'énergie dont elle a besoin ». Dans le cadre de la préparation des missions Mars, un surcoût énergétique est nécessaire pour surveiller la stabilité de l'ECA, en particulier pour la phase de R&D qui utilisent un appareillage de monitoring gourmand en énergie, mais nécessaire à une compréhension approfondie de la boucle de flux de matière. À la fin de la phase pilote, l'ECA pourrait donc nécessiter une quantité réduite significativement plus faible d'énergie pour son fonctionnement. De plus, de l'énergie est dépensée pour maintenir en permanence la stabilité d'un ECA. En cas de perturbation, les contre-mesures visant à maintenir l'homéostasie de l'écosystème (§7.3.4) dans son ensemble présentent un coût énergétique. Un ECA hypermonitoré et contrôlé est donc caractérisé par une consommation énergétique nettement supérieure à celle d'un écosystème livré à lui-même en cas de changements des conditions environnementales. Il pourrait donc être utile qu'il puisse bénéficier de l'usage de microtechnologies vertes pour optimiser la performance énergétique des processus de biosurveillance, mais également des technologies liées à l'exploitation globale de l'ECA. Signalons que la gestion de l'énergie au sein des ECA et des habitats clos est abordée au §10.4 sur l'habitat autonome. On notera la difficulté de se passer totalement (et même partiellement) d'une source d'énergie d'origine nucléaire, au moins pour les premières étapes de colonisation de la planète Mars.

✧ « La Nature adapte la forme à la fonction ». Ce point est intéressant, étant donné que l'on peut considérer que l'adaptation de la forme à la fonction est relativement bien intégrée dans les processus de design et de conception de plusieurs éléments de l'ECA et de l'habitat clos. C'est en particulier le cas pour l'optimisation de l'ergonomie et celles des volumes, afin d'autoriser une multifonctionnalité

de l'espace disponible dans chacun des lieux de vie et de travail de l'équipage. Il en va de même pour le compartiment des plantes, qui emploie des systèmes de culture automatiques dont la structure évolue au cours de la croissance pour s'adapter à la taille des cultivars ou qui font appel à des serres verticales (§10.3), afin d'améliorer le rendement par unité de surface.

De plus, certains équipements comme les vitrages autonettoyants, basés sur des matériaux avancés ou intelligents, qui adaptent leur morphologie à leur fonction par une démarche biomimétique au sens propre. Un intérêt clair réside dans le développement de matériaux « biomimétiques » pour les ECA, en particulier pour le développement : d'adhésifs biomimétiques : à l'image de la colle naturelle développée dans le cadre du projet « Glue2Space » de l'ESA et du Fraunhofer Institute for Manufacturing Technology and Applied Materials Research (IFAM)²²⁹. Ces adhésifs présentent de nombreux intérêts : économie de masse (dématérialisation), haute stabilité, forte adhésivité, faible endommagement des surfaces, application possible en milieu liquide, résistance à l'humidité, résistance aux micro-organismes, biocompatibilité ; et de surfaces biomimétiques : c'est-à-dire de revêtements antibactériens pour la prévention de biofilms (domaines d'application : medtechs, sécurité, antifouling, etc.) ou encore de revêtements anti-congélation (domaines d'application : congélateur, climatisation, aviation).

Relevons enfin que les architectes spatiaux sont friands de « transformer » des concepts de la nature dans leur designs (Gruber & Imhof 2007).

✧ « La Nature recycle tout ». C'est précisément l'idéal qu'ambitionne d'atteindre la mise en place d'un recyclage intégral (§7.4). L'optimisation d'un ECA cherche à maximiser le bouclage des flux de matières (Morowitz et al. 2005), mais actuellement, tout n'est pas recyclable, en particulier si l'on considère le hardware nécessaire pour faire fonctionner cet écosystème hybride.

D'autre part, le fonctionnement des ECA s'inspire directement de la faculté de la Biosphère à utiliser avec parcimonie les ressources à disposition et à maximiser le recyclage sous toutes ses formes (Unruh 2008). De là à dire que la nature « recycle tout » ? Il semble que contrairement à cette assertion de Janine Benyus, la Nature ne recycle pas tout ! En effet, les déchets de la Biosphère ne sont pas tous systématiquement utilisés comme ressources. L'énergie fossile est basée sur l'utilisation de sédiments datant de plusieurs centaines de millions d'années et issus par exemple de coquilles d'animaux qui n'ont pas été exploitées. Les émissions de méthane générées par la fermentation de matières organiques en milieu anaérobie par les micro-organismes méthanogènes des océans, du sol et des ruminants ne semblent que faiblement exploitées par les méthanotrophes (Oremland & Culbertson 1992; Milkov 2004). Que dire de l'oxygène produit par photosynthèse qui s'est accumulé dans l'atmosphère depuis plus de

²²⁹ Voir la présentation du Dr. Klaus Slenzka, « Space Biomimetics, Biomining, and Applications », OHB System , 07.02.2012 www.oosa.unvienna.org/pdf/pres/stsc2012/tech-05E.pdf

deux milliards d'années jusqu'à atteindre le cinquième de sa composition (Ayres 2004) ?

Ajoutons enfin que si des approches telles que l'écologie industrielle cherchent à valoriser les déchets du système industriel – mais également l'ensemble de ces ressources –, il s'agit aussi de faire preuve de « bon sens » dans l'application de ses principes. S'inspirer des bonnes pratiques de la Biosphère implique alors un design de réseau alimentaire industriel cohérent ne visant pas le recyclage à tout prix. À titre d'exemple, l'observation des écosystèmes naturels nous enseigne que les herbivores ne mangent pas de farines animales. Il en ressort qu'une certaine retenue est de mise lors du bouclage de tels flux de matière dans les écosystèmes industriels, faute de quoi de mauvaises surprises pourraient apparaître.

Ajoutons qu'une biomimétisation du système industriel n'a pas forcément un impact positif sur l'environnement. Par exemple, le fait de s'inspirer de chaîne alimentaire pour échanger des matières dans le système industriel n'est pas forcément acceptable en termes d'impact environnemental sur la Biosphère.

✧ « La Nature parie sur la biodiversité ». Au sens employé par Janyne Benyus, on peut considérer que la Nature « parie » sur la biodiversité par exemple lorsqu'un nouvel organisme apparaît dans un écosystème donné que ce soit par immigration, ou éventuellement après une succession de mutations au sein d'une espèce présente de longue date. Naturellement, une nouvelle espèce, ou alors une augmentation de la variété génétique au sein d'une population d'individus d'une espèce donnée est à même de causer une ou des perturbations tant au niveau du système naturel que de ses organismes. Cette perturbation peut exercer une influence qui pourrait déstabiliser l'écosystème à plus ou moins long terme. Elle peut provoquer l'apparition de processus de sélection naturelle accélérant en quelque sorte l'évolution de l'écosystème. Toutefois, si le risque qu'une perturbation de biodiversité puisse causer la disparition de certaines espèces – voire l'effondrement de l'écosystème dans un cas extrême – est réel, ce dérèglement ne s'avérera pas forcément négatif systématiquement. Il permettra même parfois d'améliorer le système, par exemple en renforçant la résilience globale des cycles adaptatifs (Holling 1986; Folke et al. 2004; Holling et al. 2002; Holling 2001) (voir §7.3.4.3.a).

Au sein de la Biosphère, le nombre des écosystèmes fonctionnant en parallèle et en série est gigantesque. Si quelques-uns parmi eux dysfonctionnent ou disparaissent, ils sont immédiatement relayés par d'autres et le biotope général – l'écosphère – ne varie pratiquement pas : c'est l'effet de masse, la redondance étant énorme. Elle se superpose d'ailleurs à la capacité d'adaptation génétique des espèces aux modifications du milieu, qui représente un des moteurs de l'évolution.

Dans un ensemble de taille beaucoup plus limitée tel qu'un ECA, ce phénomène de masse et de capacité d'adaptation évolutive à long terme ne peut évidemment pas se mettre en place spontanément à coup sûr.

Une manière de pallier ce manque de variété consisterait à maintenir la constance du biotope, si nécessaire par des moyens externes artificiels, en simulant la robustesse et l'effet de masse du système.

Il faudrait ensuite pouvoir disposer d'une réserve génétique suffisante des espèces en place et des espèces de secours pour être capables de remplacer tel écosystème défaillant par un système neuf et/ou différent, en simulant ainsi la capacité d'adaptation de la Biosphère. Cependant, la constance des conditions écosystémiques ne peut être garantie sur des périodes prolongées, et une réserve génétique conséquente n'est pas forcément envisageable au vu de la complexité qu'elle induit en termes de surveillance et de maintien de la santé de l'écosystème. Dans le cas d'un ECA comme MELiSSA, l'un des objectifs cruciaux consiste justement à minimiser les risques de déstabilisation de la boucle.

C'est pour cette raison que de tels ECA présentent une biodiversité qui peut être considérée comme relativement faible, comme nous l'avons discuté au §7.3.1.2. Quant à savoir si cela pose problème, Sugihara et Ye (2009) stipulent que des assemblages minimalistes d'espèces caractérisés majoritairement par des interactions comme le mutualisme, comme c'est le cas dans les ECA, permettent de structurer l'écosystème en minimisant la compétition. De plus, dans les écosystèmes naturels, Briand et Cohen (1987) démontrent que la longueur moyenne et maximale d'une chaîne alimentaire est indépendante de la productivité primaire.

Concrètement, le nombre d'espèces de plantes que l'on fait pousser dans les chambres de culture se limite généralement à une vingtaine, voire à une trentaine. Ce sont celles les mieux caractérisées, faciles à exploiter, et présentant un intérêt nutritionnel (§8.3). Cependant, elles ne sont de surcroît pas toutes cultivées en parallèle et font l'objet de rotations notamment faute de place à disposition. Afin d'assurer la biosécurité de l'ECA (Prokhorov 2009), on ne souhaite pas que les espèces de micro-organismes (ou des parties de ceux-ci) puissent entrer en contact les unes avec les autres à un moment donné de leur existence. Certains bioréacteurs doivent ainsi rester axéniques, c'est-à-dire se développer dans un milieu stérile. Il est donc nécessaire que toutes cellules ou tout élément génétique mobile (comme des plasmides) soient correctement filtrés à la sortie de chacun d'entre eux. Les interconnexions entre les compartiments sont donc fortement circonscrites. Et lors du passage d'un bioréacteur à l'autre, les interactions sont « canalisées » pour s'assurer que ce soit bien les flux de molécules pertinentes pour le bouclage des flux de matières qui passent d'un compartiment à un autre, et bien entendu pour faciliter le contrôle et le monitoring de ces flux aux interfaces (§7.3.1.3), puisque l'on désire strictement éviter ces contaminations croisées afin de favoriser la stabilité à long terme du système (Godia et al. 2002). Cette maîtrise, à la fois du nombre d'espèces végétales et des populations bactériennes en présence, ainsi que des conditions environnementales, permet d'assurer une certaine stabilité des compartiments et de l'ECA dans son ensemble (§7.3.3.1). À nouveau, il est en effet indispensable de maintenir l'homéostasie des systèmes des biomolécules propre au métabolisme des organismes de l'ECA et de pouvoir corriger toute dérive ou oscillation catastrophique. Raison pour laquelle un ECA comme MELiSSA présente une biodiversité limitée, mais contrôlée.

Signalons toutefois que dans le bioréacteur digérant les matières fécales – comme le compartiment liquéfacteur de MELISSA (§4.2.1.2.b) –, on pourra retrouver jusqu'à plusieurs centaines de souches

bactériennes (Arumugam et al. 2011). Il s'agit d'une biodiversité relativement grande, mais qui reste toutefois confinée dans le compartiment liquéfacteur et le système gastro-intestinal des membres de l'équipage. Cette considération est d'ailleurs théorique, et part du principe, que l'hygiène des membres de l'équipage est suffisante pour éviter toutes contaminations. Des biocides devront d'ailleurs être utilisés de manière ciblée dans l'habitat clos pour éviter le développement de biofilms ou de souches pathogéniques pour l'homme et les autres organismes de l'écosystème.

Ajoutons encore que la faible biodiversité est compensée par le fait que les organismes ne sont pas isolés autant que dans une expérience in vitro (en particulier les micro-organismes), puisque les flux circulent et traversent en permanence les différents compartiments. À certains points de vue, on peut donc estimer que la biodiversité est somme toute assez élevée à l'échelle de l'écosystème, en fonction du nombre restreint de compartiments en présence.

D'autre part, dans la Biosphère elle-même, on estime que plus de 99.9 % des espèces ont disparu au cours de l'évolution et l'on peut considérer qu'elles sont en quelque sorte, pour la plupart, « programmées » pour s'en aller à terme (Raup 1991). Dans cette perspective, la disparition d'une espèce est un phénomène parfaitement normal. L'évolution et le développement des nouvelles fonctionnalités au sein de la Biosphère se sont faits au prix d'une sélection drastique des plus efficaces d'entre elles. La Nature est tout sauf statique et favorise la mise en place d'« équilibres dynamiques » (§7.3.4.1). L'origine de la biodiversité se trouve dans les modifications de l'environnement : les changements climatiques, les événements géologiques ou les chutes de météorites ont par exemple causé des extinctions majeures, mais ces destructions ont laissé la place à de nouvelles variétés d'organisations biologiques. De plus, les espèces peuvent s'adapter : en se déplaçant et en colonisant de nouveaux territoires ou en évoluant génétiquement. Ce que l'on ne sait pas, c'est lesquelles s'adaptent le mieux dans des conditions prédéfinies et comment. Un simulateur d'ECA permet justement d'observer l'effet de modifications sur de longues périodes.

✧ « La Nature travaille à partir des expertises locales. Cela correspond bien aux objectifs d'un ECA qui vise, en tant que système quasi clos, à capitaliser autant que possible sur les « compétences » en présence, minimiser les apports extérieurs en termes de fonctions « biologiques » ou de nutriments. L'objectif d'une telle plateforme consiste principalement à déterminer quelles sont les associations d'espèces – et si possible, d'un faible nombre d'entre elles – permettant le panachage de fonctionnalités biologiques complémentaires à même d'achever un bouclage de flux de matières au sein d'un ECA.

✧ « La Nature limite les excès de l'intérieur ». Cette assertion est tout à fait valable dans le cas des ECA. Ce type de système cherche en effet à établir, puis à maintenir autant que possible un équilibre dynamique, dans lequel des oscillations d'amplitudes très limitées sont tolérées, tout comme les bioaccumulations et de dissipations qui sont surveillées attentivement (§7.3.3.2.d). L'apparition de ces phénomènes fait l'objet de contre-mesures rapidement déployées (§7.3.4.5).

✧ « La Nature utilise les contraintes comme source de créativité ». Une affirmation qui s'applique parfaitement aux ECA et aux habitats clos. Il s'agit, à n'en pas douter, de tirer profit des conditions extrêmes en développant des solutions innovantes, afin d'optimiser l'ensemble des fonctionnalités de l'ECA, ainsi que les conditions de vie de l'habitat clos, de manière à ce que les différents organismes puissent y vivre en symbiose. Il s'agit donc mobiliser une démarche globale – l'approche systémique (§5.1.3.1) – pour veiller à ce que chaque optimisation apportée au système soit intégrée et contribue à améliorer la performance du système dans son ensemble, et ce, sans renforcer les autres contraintes ou engendrer des effets rebonds négatifs pour les autres organismes. La créativité est un des moteurs clés pour assurer le fonctionnement et le suivi d'un ECA.

✧ Limites de l'approche du biomimétisme. Pour terminer, ce volet sur le biomimétisme, ajoutons qu'il présente un certain nombre de limites, pour pouvoir être présenté comme une méthodologie à même de répondre de manière pragmatique aux problématiques du fonctionnement actuel de l'écosystème industriel, grâce à une bioinspiration des organismes biologiques et de leurs écosystèmes naturels. En effet, la Biosphère présente encore d'autres limites et contraintes que celles présentées plus haut :

- dans la Biosphère, les espèces évoluent lentement (excepté les micro-organismes) (Dawkins 1999), ce qui n'est pas le cas pour l'évolution de certains biens de consommation (S. H. Levine 2000; S. H. Levine 2003) ;
- il existe un très grand nombre d'espèces biologiques, donc un nombre immense de connexions possibles (Holt 2006) ;
- les « espèces-clés » ne représentent pas nécessairement une grande biomasse (Wells 2005; Wells & Darby 2006; Tews et al. 2003) ;
- le système économique n'a pas d'équivalent au producteur primaire, analogue au rôle joué par la photosynthèse, et ses décomposeurs sont nettement moins efficaces (Liwarska-Bizukoje et al. 2009).

Finalement, appliquer les principes du biomimétisme, et les méthodologies associées, au développement de produits ne rime pas forcément avec écoconception, efficacité énergétique et durabilité (Mélo 2012). Et ce ne sont pas les performances énergétiques d'un ECA comme MELiSSA, qui présente encore une dépendance significative aux sources d'énergie non renouvelables qui peuvent le contredire. Néanmoins, comme évoqué au début de cette étude, les ECA sont par essence un exemple de la mise en œuvre d'une approche de bioinspiration poussée à l'extrême. Un simulateur d'ECA semble dès lors représenter une plateforme pertinente pour les adeptes du biomimétisme, parce qu'elle permet d'explorer et de tester plusieurs des principes du biomimétisme. Parmi ces derniers, certains ont pour but d'améliorer la performance environnementale des systèmes de recyclage actuels, par exemple via le développement de systèmes de contrôle biomimétique des bâtiments ou de matériaux biomimétiques avancés.

7.3.2 Un optimiseur de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs

Les systèmes microbiens sont essentiels pour accélérer le cycle des éléments nutritifs et atteindre une grande capacité de bouclage dans les systèmes de support-vie biologiques avancés (Hendrickx et al. 2006). C'est pourquoi la plupart des écosystèmes clos intègrent des (photo-)bioréacteurs bactériens. Dans un ECA comme MELiSSA, leur pilotage précis et instantané est indispensable pour assurer un approvisionnement adéquat de l'équipage en ressources (alimentation, eau, oxygène) et un recyclage continu des déchets organiques. Les procédures de sélection des souches représentent un important challenge puisque le choix de l'espèce va déterminer l'efficacité, la fiabilité et la biosécurité de ce pilotage exercé en continu. Dans ce contexte, un simulateur d'ECA basé sur des cultures de micro-organismes constitue un cadre pertinent pour la caractérisation, l'étude expérimentale et l'optimisation de bioprocessus de production, tant au niveau d'un (photo)bioréacteur (souches, métabolisme, procédés, performance, etc.) (Ganzer & Messerschmid 2009) qu'au niveau de l'écosystème dans son ensemble (intégration, interconnexion, assemblage, etc.) (Godia et al. 2004).

Les thématiques et sujets de recherche liés à l'optimisation de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs incluent :

1. L'optimisation des souches de micro-organismes (screening, sélection et/ou modification) :

- identification et sélection des souches de micro-organismes minimisant les risques de d'instabilité opérationnelle ou de pathogénicité ;
- étude de génomique comparative et analyse phylogénétique pour la sélection des souches des bioréacteurs ;
- caractérisation, modification et construction, grâce au génie génétique, de souches bactériennes possédant des propriétés très particulières, inconnues dans les écosystèmes naturels ;
- étude du métabolisme de consortium microbien, par exemple :
 - contrôle de l'axénicité ;
 - comparaison de la stabilité et/ou de la performance de cultures axéniques vs mixtes de souches et cultures bactériennes moins contrôlées ;
 - couplage des réactions du métabolisme énergétique d'anabolisme (synthèses) et de catabolisme ;
 - analyse des flux métaboliques en conditions de culture contrôlées, pour la nitrification en autotrophie, en mixotrophie et en hétérotrophie.

2. Le développement, le test et la sélection de techniques, de protocoles et de procédures permettant l'optimisation des conditions de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs, ainsi que l'amélioration de leur performance de fonctionnement (meilleur taux de bouclage des flux de matières)

(Ilgrande et al. 2019), tout en maximisant la biosécurité :

- optimisation de la procédure d'inoculation des (photo)bioréacteurs ;
- optimisation du design du (photo)bioréacteur : taille, volume par kg de matière traitée (masse sèche de déchet organique), stratégie de culture, conditions hydrodynamiques (taux de dilution, processus de condensation, taux de fermeture de la boucle, transfert gaz-liquide), interface entre compartiments, modalités opérationnelles ;
- développement de modèles mathématiques décrivant précisément les dynamiques de croissance des micro-organismes ;
- optimisation des conditions de fonctionnement en routine des (photo)bioréacteurs (en batch, en continu, etc.) : milieux de culture, conditions de culture (température, lumière, oxygène, pH, conductivité, pression, turbidité, concentration de particules en suspension, etc.), cinétiques de croissance microbienne, durée des cultures, procédures de calibration (paramètres physico-chimiques), procédures de stérilisation, procédures de maintenance, réduction de la consommation d'énergie, réduction des consommables ;
- étude approfondie des processus enzymatiques impliqués dans le cadre d'un fermenteur fonctionnant sous anaérobiose stricte : établissement d'un suivi précis des conditions réactionnelles (pH, redox, pression, etc.) et d'un suivi des substrats consommés et des produits formés ; contrôle de la prolifération de la biomasse.
- développement de méthodologie de sélection du spectre optique pour la photosynthèse, avec prise en compte de la morphologie et de la réflexion pour l'optimisation des volumes, de la croissance en fonction des entrants (lumières, source azote: nitrate vs ammonium, taux de protéines), ainsi que des coûts (brassage, pompage du milieu) ;
- développement de procédure de maintien d'un coefficient d'échange de gaz optimal entre l'oxygène consommé et produit ;
- développement de stratégies de prévention (et des contre-mesures associées) afin d'éviter :
 - une contamination des cultures ou l'accumulation de substances inhibitoires ;
 - des phénomènes d'auto-ombrage (induisant une réduction locale de l'activité photosynthétique).
- design et consolidation de stratégies d'intégration et d'interconnexion des compartiments :
 - développement de procédures d'évaluation, de validation et d'intégration progressive des (sous-) systèmes durant des périodes de temps s'allongeant progressivement. Paramètres : localisation, accès, modalités d'interconnexion, gestion des flux, contrôle thermique, axénicité, piégeage de contaminants, purification, etc. ;
 - optimisation des équipements aux interfaces entre les compartiments : dispositifs de fibres optiques dans les bassins de production ; filtres, pompes, capteurs, détecteurs, etc. ; systèmes / procédures d'échantillonnage et de récolte : type d'échantillons à

prélever (solution, biomasse, volume gazeux, etc.), localisation, fréquence, volume, stockage, automatisation, modalité de mesure (en continu ou off-line), etc. ; systèmes de calibration et d'optimisation de la précision.

- développement de stratégies de contrôles de la performance des processus :
 - analyse de performances de la boucle pour différentes configurations / scénarios ;
 - étude de caractérisation des processus de support-vie sur l'ensemble de la boucle de l'ECA : gestion du pH, de la température, de la qualité du condensat, des éléments gazeux en trace, etc. ;
 - design et consolidation de stratégies de maintenance des équipements de monitoring et de contrôle : optimisation de la logistique et de l'instrumentation analytique, contrôle de l'axénicité, suivi des flux entrants / sortants, optimisation des processus de filtration, suivi des flux d'air, suivi des zones tampons, identification de fuite, optimisation des conditions de stockage, étude de la présence de particules, de phénomènes de bioaccumulation (métaux lourds, contaminants chimiques, etc.) à l'échelle d'un ou plusieurs compartiments (voir §7.3.3.2.d) ;
 - optimisation des procédures : de calibration, de stérilisation, de nettoyage, de contrôle de la ventilation, de refroidissement des équipements ;
 - optimisation de l'interface utilisateur (voir §9.3.3) : temps de réponse, convivialité d'utilisation, facilité, clarté, contrôle à distance et communication ;
 - automatisation des systèmes associés visant à minimiser les activités de maintenance répétitives pour l'équipage et à favoriser le pilotage et le contrôle et la mise en œuvre à distance de procédures de réparation.

3. L'amélioration des connaissances sur les (photo)bioréacteurs industriels (ingénierie des systèmes / génie des bioprocédés) : optimisation des rendements de bioprocédés impliqués dans la production alimentaire, la production de molécules, l'exploitation de systèmes de fermentation, le recyclage des déchets organiques solides, etc. :

- maximisation de la biomasse obtenue, de la catalyse enzymatique ;
- développement de bioréacteurs améliorant l'efficacité et la vitesse de conversion de ressources renouvelables en produits intermédiaires ;
- élaboration d'instrumentations de contrôles avancés (fermeture automatique des boucles de procédés).

Lorsque les bioprocédés de l'ECA sont optimisés pour un bouclage des flux de matières, ils présentent également un potentiel d'industrialisation à une plus grande échelle pour la conversion de biomasse, la

production d'enzymes, de suppléments alimentaires, de cosmétiques ou de médicaments. Outre la production alimentaire ou le domaine pharmaceutique, d'autres usages industriels de mini-bioréacteurs fonctionnant de manière parfaitement contrôlée avec un haut degré de biosécurité ont des applications dans les biotechnologies environnementales, ainsi que dans le génie chimique et la microbiologie industrielle. Parmi les applications « terrestres » issues d'ECA de type MELiSSA, citons les systèmes de traitement microbiens des déchets organiques solides ou de recyclage des eaux usées urbaines (§7.4.2.1) ou des bases isolées (comme la station de recherche Concordia, voir §4.2.1.4), et bioréacteurs pouvant être intégrés dans des habitats autosuffisants basés sur des fermes verticales (§10.3). En outre, de tels procédés microbiologiques rendent possible une valorisation de la biomasse dans des bioraffineries, à même de synthétiser des produits biosourcés (ou « biomanufacturés »), parfois en de relativement grands volumes. Le §7.4.4 reviendra en outre sur les voies de synthèse de produits biosourcés à même de valoriser matériellement le contenu ligno-cellulosique.

En préambule des prochains chapitres, ajoutons que la présence de micro-organismes dans les différents sous-systèmes peut être également perçue comme source de réels dangers, d'une part car les transferts génétiques entre micro-organismes sont facilités dans un environnement confiné (voir le §8.2.3 sur le transfert horizontal de gènes), et d'autre part à cause du risque de contamination microbienne potentiellement pathogénique dans l'alimentation produite par l'ECA (voir le §8.3.1.3 sur le contrôle qualité chimique et microbien de la production de nourriture) ou dans les l'habitat lui-même (voir le §10.5 sur le contrôle de la qualité de l'air et des surfaces). Signalons que l'évaluation de la santé des micro-organismes sera présentée dans la perspective de la biologie systémique, en particulier la transcriptomique bactérienne et la microbiomique (§8.3.3). Enfin, comme les ECA permettent, de manière générale, la mise au point de systèmes microbiens optimisés, dotés de processus performants en termes d'autonomie, d'autosuffisance et d'auto-régulation, ils présentent un intérêt pour la communauté des mathématiciens (la modélisation prédictive de l'ECA dans son ensemble sera quant à elle traitée au §9.2.1) et celles des automaticiens et des chercheurs en intelligence artificielle (§9.2.3).

7.3.3 Une plateforme expérimentale de suivi de l'exposome

Le simulateur d'ECA peut être considéré comme une plateforme expérimentale permettant de suivre attentivement les interactions en système clos de l'équipage avec son environnement. Ce chapitre aborde la mesure et de suivi des conditions écosystémiques en présence dans un ECA, et se compose des deux sections suivantes :

- la maîtrise des risques biologiques et chimiques (§7.3.3.1) ;
- l'hypermonitoring de l'exposome (§7.3.3.2).

7.3.3.1 *La maîtrise des risques biologiques et chimiques*

Les risques liés aux vols spatiaux incluent les radiations, la microgravité, l'augmentation de la virulence microbienne, le stress, la perturbation de cycles endocriniens et l'isolation (Crucian et al. 2009). Chez l'homme, des réponses métaboliques problématiques peuvent apparaître, telles qu'une réduction de la fonction immunitaire cellulaire, une altération de la balance des cytokines, une réactivation de virus latents, une altération des processus de cicatrisation de blessures. Une exposition de longue durée d'humains à l'environnement extrême, propre aux habitats spatiaux sous fortes contraintes, peut ainsi amener les membres de l'équipage à développer à terme des problèmes de santé tels que des infections, de l'hypersensibilité, des réactions auto-immunes, voire de cancers. En présence de tels risques, il est donc essentiel d'anticiper, évaluer, prévenir et limiter autant que possible l'apparition de symptômes aigus ou de maladies chroniques.

Tout d'abord, l'apparition quasiment inévitable de contaminations au sein d'un système clos rend nécessaires une évaluation des risques associés et la mise en place de systèmes de détection précoce, afin de pouvoir déployer à temps les contre-mesures et traitements opportuns. Plus que dans les systèmes ouverts, les dérèglements survenant dans un ECA peuvent avoir rapidement des conséquences catastrophiques, en raison du confinement et de l'isolation des habitats clos, ainsi que de relativement faibles volumes en présence. Dès lors, un des enjeux principaux des ECA nécessite de pouvoir exercer un contrôle rigoureux de la stabilité du système et de ses sous-systèmes associés, afin d'assurer la bonne santé à long terme de ses organismes (équipage, végétaux, micro-organismes, etc.) (Pechurkin et al. 1996). En conséquence, il devient strictement indispensable de développer et mettre en œuvre une stratégie de bonne gestion des risques pour s'assurer que le LSS fonctionne continuellement en toute sécurité, et garantir le succès d'un vol habité (Prokhorov 2009).

Dès la préparation au sol, la maîtrise des risques biologiques et chimiques se révèle particulièrement cruciale. Dans ce contexte, un simulateur d'habitat clos peut servir de modèle pour la mise en place d'un système de gestion des risques en conditions extrêmes à même d'offrir des perspectives inédites dans l'analyse simultanée de risques variés. Afin de répondre à de tels enjeux, une surveillance de l'ECA de tous les instants doit être assurée par le biais d'une « hyperperception » des conditions écosystémiques, doublée d'un « hypermonitoring » de la santé des organismes. Deux démarches – intervenant en parallèle – sont nécessaires, permettant de distinguer :

- la biosurveillance de l'exposome : monitoring et contrôle continu des conditions environnementales auxquelles sont exposés les organismes (voir §7.3.3.1.a ci-après) ;
- la biosurveillance de la santé des organismes : évaluation continue des effets de l'exposome sur les organismes, en particulier en utilisant les outils des sciences omiques, raison pour laquelle ce sujet sera traité en détail au §8.2.

L'originalité de l'approche du programme Oïkosmos repose ici sur la combinaison des outils et concepts respectifs de l'écologie industrielle et des sciences biomédicales, dans le but d'étudier simultanément les conditions écosystémiques et les organismes humains, microbiens et végétaux. La possibilité (ou plutôt la nécessité) de coupler la biosurveillance de l'exposome à celle de la santé des organismes rend l'installation d'autant plus pertinente pour prévenir et évaluer les risques écologiques et sanitaires liés aux éléments et molécules qui composent et circulent dans l'ECA, et pérenniser la stabilité de l'écosystème.

7.3.3.1.a L'exposome

La recherche terrestre sur les risques pour la santé humaine, tout comme celle sur les risques environnementaux tend à se concentrer sur une catégorie particulière d'exposition telle que la pollution de l'air ou de l'eau, les modes de vie, la nutrition, le comportement et le stress, ou encore le type d'infection. Ce découpage empêche l'étude collective de l'ensemble de ces expositions environnementales auxquels les organismes (et les humains en particulier) sont soumis. Or, cette collecte combinée pourrait susciter un intérêt certain, tant de la part de l'écologue industrielle et du microbiologiste, que de l'épidémiologue ou du nutritionniste. Un démonstrateur d'ECA permet de mesurer et suivre en parallèle les effets de la totalité – ou du moins de la plus grande partie – de ces expositions non seulement sur les êtres humains, mais aussi sur les autres organismes de l'ECA.

En octobre 2010, le magazine Science a publié un article qui examine la notion d'« exposome » (Rappaport & M. T. Smith 2010). L'idée centrale émanant de ce concept, repose sur le fait que l'environnement dans lequel vivent nos gènes peut être considéré comme plus important que nos gènes eux-mêmes. Ceci suggère par exemple que l'étude de la génomique pour traiter les maladies n'est plus aussi pertinente puisqu'une grande part du risque de maladie est lié précisément à l'influence qu'exerce l'environnement sur un organisme : les cocktails moléculaires dans lesquels baignent nos gènes modifient leur expression, avec pour résultante des effets physiologiques sur l'organisme.

Selon Rappaport et Smith (Rappaport & M. T. Smith 2010), l'organisme est soumis à des perturbations causées par l'environnement externe (comme des radiations, des stress physiologiques et psychologiques liés au style de vie, aux infections, à la consommation de drogues et bien entendu à l'alimentation). Il considère l'exposome comme la combinaison des molécules de l'« environnement chimique intérieur » des organismes – qui circulent dans le sang, la lymphe, les liquides interstitiels ou qui sont contenues dans le cytoplasme cellulaire – qui ont subi une modification provoquée par ces perturbations. Les expositions peuvent impliquer la pénétration dans l'organisme de xénobiotiques, induire des processus d'inflammation, des peroxydations lipidiques ou des stress oxydatifs, ou encore

impacter la flore commensale (voir §8.3.3). Ces molécules issues de (ou produites par) ces perturbations, à l'image de réactifs électrophiles, de métaux, de disrupteurs endocriniens, d'immuno-modulateurs ou encore de récepteurs protéiques activés, constituent ensemble un « exposome ». Il peut être considéré comme la signature interne – composées de bio-indicateurs – permettant de caractériser les effets d'une exposition sur un organisme. Notons par ailleurs que la définition de cette nouvelle science « omique » couvre des champs qui peuvent parfois différer légèrement. Par exemple, d'autres auteurs définissent l'exposome non pas par les réponses physiologiques et génomiques de l'exposition, mais comme la *somme des expositions* de l'homme à l'environnement, que Borrel définit dans *Nature* comme « the full catalogue of a person's environmental exposures throughout their life » (Borrell 2011). Cette définition est en lien avec la *qualité* de l'environnement, et correspond aux conditions écosystémiques de l'atmosphère, de l'eau, mais aussi des nutriments présents qui pourraient influencer, pénétrer ou être consommé par les êtres vivants. Dans cette perspective, des chercheurs considèrent que le « responsome » représenterait la totalité de l'impact de l'environnement sur les gènes (Vlaanderen et al. 2010). Le « réactome » fait quant à lui référence à l'ensemble des voies et les procédés biologiques et métaboliques associés à ces effets de l'environnement sur l'homme (Joshi-Tope 2004).

Le concept d'exposome présente un intérêt direct dans le contexte du programme Oikosmos, aussi bien pour l'homme que pour les autres organismes de l'écosystème. Dans la présente étude, c'est la définition de Borrell qui est retenue pour décrire l'exposome comme la totalité des expositions auxquelles les organismes de l'ECA peuvent être soumis en présence des conditions écosystémiques de l'habitat clos, et en particulier celles qui sont liées aux polluants de l'eau (voir le §7.3.3.1.b sur l'écotoxicologie) ou de l'air (voir le §10.5 sur les habitats sains), ainsi que celles propres aux aliments consommés (voir le §8.3.2.2 sur la nutriginomique).

Que ce soit pour une simulation terrestre ou une mission spatiale, un monitoring environnemental approprié est requis pour indiquer, identifier et mesurer les substances pouvant influencer le comportement physiologique, physique ou psychologique de l'équipage, mais également le métabolisme des autres organismes de l'ECA (§8.2). Ce contrôle implique donc que la qualité de l'environnement intérieur d'un habitat clos soit optimale et minimise tout risque sanitaire pour la santé des organismes de l'ECA. Il est impératif de mettre en place des procédures d'alerte ou de contrôle permettant de diagnostiquer suffisamment tôt les effets indésirables d'une exposition et de minimiser les risques d'exposition (chimique, physique ou biologique) potentiellement dangereuse pour les membres de l'équipage (§7.3.3.2.b). Cette surveillance englobe l'environnement interne, soit l'atmosphère que les membres de l'équipage vont inhaler, les ressources en eaux et toutes les surfaces du simulateur, de la navette ou de l'habitat extraterrestre occupé par l'homme, ainsi que l'ensemble des molécules absorbées à travers l'alimentation afin d'évaluer la somme des expositions – et donc ce fameux « exposome » – auxquelles sont soumis les êtres vivants de l'ECA.

Connaître, prévoir et maîtriser l'exposome de l'ECA consiste donc à établir un suivi et un contrôle des

conditions écosystémiques *dans leur ensemble*. Naturellement, atteindre un tel objectif est tout sauf trivial. Concrètement, les ECA avancés ne doivent pas se borner à monitorer uniquement des paramètres tels que les taux d'oxygène et de dioxyde de carbone atmosphériques. Ils doivent intégrer, en fonction des types de missions (simulation au sol, mission de transfert, base planétaire, etc.) une biosurveillance étroite des principales molécules, des principaux composants et des éléments en trace, présents dans les compartiments de l'ECA, dans l'atmosphère et les surfaces de l'habitat clos.

Évaluer la composition de l'exposome, consiste à suivre le comportement et le devenir des éléments et molécules pénétrants et circulants à tous les niveaux de l'ECA : compartiments de l'ECA, réserves d'eau et d'aliments, surfaces et atmosphères de l'environnement intérieur de l'habitat clos, etc. Ce traçage semble strictement nécessaire pour que les conditions environnementales et sanitaires restent stables et optimales au sein de l'habitat, et ainsi participer à garantir la santé, la performance et le confort de l'équipage, mais aussi à assurer le bon fonctionnement de l'ECA, et donc la bonne santé de tous les organismes qui le compose.

Ces développements revêtent un intérêt terrestre, particulièrement dans le domaine de la santé. Lors d'études épidémiologiques, les erreurs sont fréquentes lorsqu'on demande aux sujets étudiés (comme des enfants malades) des informations sur ce qu'ils ont mangé la veille. Par exemple, ils oublient facilement certains aliments ou imaginent en avoir ingéré d'autres alors que ce n'est pas le cas (Baranowski et al. 2012). Pour les chercheurs dans le domaine de la santé, cette problématique biaise également des études portant sur l'exercice physique, le stress, la pollution ou la fumée, qui reposent sur un compte rendu des expositions lors d'entretiens ou de questionnaires. Le développement de méthodes permettant de mesurer effectivement l'exposition à l'environnement rend les informations à la fois plus précises et objectives. Certains profils d'exposition personnalisés sont établis en utilisant des tests sanguins, d'autres par le biais de senseurs capturant les mouvements, stockant des photos des repas et échantillonnant l'air respiré (Borrell 2011). Dans son papier, Borrell imagine une telle « caméra » enregistrant en permanence tout ce que l'on mange, empêchant les participants de se tromper ou de « mentir » après coup. Depuis, les applications de santé connectée se sont largement répandues durant les années 2010 avec l'essor de l'Internet des objets (smartphones, bracelets et montres connectés), jusqu'à devenir omniprésentes. Des scientifiques, mais aussi un nombre croissant d'entreprises, ont développés ou sont en train de développer des gadgets technologiques pour monitorer l'exposome humain (§7.3.3.2), à l'image du produit « UP » de Jawbone²³⁰, « un bracelet connecté pour mieux vivre »²³¹, un précurseur en la matière. En plus de monitorer l'activité physique, de vibrer doucement pour nous rappeler de bouger, de suivre la qualité du sommeil, ces objets sont couplés à des applications

²³⁰ Page web présentant le produit Up sur le site de Jawbone : www.jawbone.com/up

²³¹ En référence à un article paru de Bilan le 07.05.2013 : www.bilan.ch/techno-les-plus-de-la-redaction/jawbone-le-bracelet-connecte-pour-mieux-vivre

pour smartphone qui ont précisément pour vocation de photographier chaque repas, afin de corrélérer notre alimentation avec les informations en provenance de bases de données nutritionnelles. Pour ce faire, ils ont une fonction de lecteur de code barres.

En utilisant des solutions permettant de récolter et de traiter des données plus fiables sur l'alimentation effective des patients ou de sujets d'étude, les chercheurs pourront ainsi faire des associations entre des expériences et des événements passés et futurs, comme l'émergence de maladies cardiovasculaires, de cancer, de diabète, etc. Et certains d'entre eux d'imaginer qu'on se rapproche un peu plus d'un jour où les questionnaires auront quasiment disparu.

Bien entendu, le chemin est encore long avant de pouvoir traquer le spectre entier des expositions à l'environnement d'un individu tout au long de sa vie afin d'établir son exposome « ultime ». En parallèle, une telle démarche soulève des enjeux en termes de « (Very) Big Data », même à l'échelle d'un individu pour la collecte de ces données avec les nouvelles TIC (§9) ou pour leurs analyses à l'aide du panel d'outils offerts par les sciences omiques (détaillés au §8). Ce que l'on peut dire à ce stade, que s'il y a bien un lieu au monde qui nous rapprocherait un peu plus d'une historisation ultime de l'Exposome (avec un grand « E ») non seulement d'humains, mais aussi des autres espèces vivant dans un écosystème, c'est bien le simulateur d'ECA ! Ajoutons encore que pour atteindre de tels objectifs, les prérequis pour les systèmes de monitoring environnementaux performants sont nombreux, ces derniers devant être caractérisés par exemple par 1) une grande robustesse, 2) une haute fiabilité, 3) une stabilité élevée, 4) un temps de réponse rapide, 5) un haut degré d'autonomie, 6) une calibration aisée et 7) une maintenance facile.

Cette surveillance minutieuse des flux de matières et d'énergie circulants à l'intérieur et entre les compartiments du système n'est possible qu'en combinant écotechnologies (§7.4.1), biotechnologies (§8.2.6), technologies de l'information et de la communication (§9.1), microtechnologies (§9.3) et technologies médicales (§9.4), tant au niveau du « hardware », que du « software ». Ensemble, ces technologies de soutien permettent le suivi permanent et quasi instantané de la performance de l'ECA, indispensables à la réussite de la mission. Concrètement, il s'agit par exemple de miniaturiser les équipements en développant des microsystèmes capables de détecter la présence de très faible concentration de toxines pouvant représentant un danger sanitaire ou environnemental (voir les bioMEMS et les enviroMEMS décrits au §9.3.1).

Les domaines terrestres pertinents favorisant les synergies de recherches en lien avec l'exposome comprennent notamment :

- les sciences moléculaires de l'environnement, à l'image de l'écotoxicologie (§7.3.3.1.b) ;
- la santé au travail (§7.3.3.2.c) ;
- la santé de l'environnement intérieur, à l'image de notion d'habitat sain (§10.5).

7.3.3.1.b L'écotoxicologie

Dans les pays industrialisés, la consommation de produits ou de services et leur utilisation polluent souvent plus que leur fabrication. Les engrais, les pesticides, les pneus, les vernis, les peintures, les solvants sont autant de produits totalement ou partiellement dissipés dans l'environnement lors de leur usage normal. On mesure depuis la deuxième moitié du vingtième siècle les risques pour l'environnement et la santé d'une diffusion incontrôlée de molécules non désirées et/ou molécules a priori inoffensives, mais posant des problèmes lorsque produites dans des quantités « astronomiques ».

Bon nombre des produits chimiques synthétisés par l'homme (comme les pesticides) ont d'ailleurs été conçus pour avoir une longue persistance dans les sols et ne pas être biodégradables. Et même s'ils existent, les exemples de micro-organismes comme *Ralstonia sp* qui développent spontanément par des processus de génie génétique « naturels » des fonctionnalités de dégradation de l'atrazine comme source d'azote et de carbone (Stamper et al. 2002) ne sont pas légion...

Afin de mieux appréhender cette problématique de la dissipation de molécules, dont certaines ne sont pas (ou peu) biodégradable, des disciplines comme l'écotoxicologie se sont développées depuis une quarantaine d'années. Comme son nom le suggère, cette dernière combine l'écologie scientifique et la toxicologie. Si la toxicologie s'intéresse particulièrement aux effets de toxiques sur l'organisme, l'écotoxicologie s'intéresse quant à elle, à l'évaluation de l'impact de produits chimiques, de micropolluants ou de contaminants non pas uniquement sur des individus, mais également sur des populations d'organismes et sur des écosystèmes (Chèvre & Erkman 2011).

Ce domaine de recherche – tout comme les sciences de l'exposition en général – bénéficierait d'opportunités tout à fait intéressantes dans le cadre du programme Oïkosmos. Dans le contexte des ECA, les « consommables » comme l'eau, l'air et la nourriture sont caractérisés et modélisés pour étudier le comportement de leur contenu en carbone, hydrogène, oxygène ou azote, pour ne citer que ceux qui représentent la majeure partie de la biomasse totale de l'écosystème. En complément, il est nécessaire de s'intéresser de près aux éléments, molécules et composés organiques et inorganiques présents en de plus faibles concentrations au sein les ECA, comme :

- des produits endogènes (hormones, métabolites, produits pharmaceutiques, et y compris leurs produits de dégradation), entrants dans le système via l'homme ;
- les produits exogènes (biocides, substances chimiques, micropolluants, nanoparticules), entrant dans le système via l'environnement ;
- les éléments minéraux en trace (K, Na, P, Mg, oligo-éléments, etc.) ;
- les éléments génétiques mobiles (comme des plasmides bactériens, des phages, etc.).

D'autre part, des contaminants chimiques, issus des matériaux, des technologies et de l'équipage, sont

susceptibles d'entrer, de circuler, voire de s'accumuler dans la boucle de flux de matières des ECA. Ils peuvent être détectés par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou par couplage de chromatographie en phase gazeuse et de spectrométrie de masse. Le contrôle fait notamment intervenir des catalyseurs ou une filtration biologique de l'air²³².

De même, la consommation de produits pharmaceutiques, et l'utilisation de produits pour les soins personnels induisent l'entrée dans la boucle de molécules et produits chimiques biologiquement actifs. De telles substances peuvent s'avérer toxiques pour les organismes, à court, moyen ou long terme. Leur devenir et leur comportement doit être mieux compris, afin d'identifier, d'anticiper et réduire au maximum l'ensemble des risques pour la santé des organismes de l'ECA. En outre, ces risques de toxicité sont amplifiés par la fermeture des boucles dans l'écosystème. Un traçage de ces molécules s'avère d'autant plus indispensable pour assurer la fiabilité, la stabilité et la sécurité de l'exploitation continue des ECA. Toutefois, il faut relever que les analyses nécessaires peuvent se révéler plus complexes dans un ECA, parce que:

- les bilans de masse sont plus difficiles à établir ;
- les échantillons sont peu homogènes ou difficiles à collecter ;
- les protocoles et méthodologies d'analyse habituels nécessitent parfois de relativement grandes quantités de produits ;
- les seuils de détection des équipements d'analyse peuvent être supérieurs aux concentrations auxquelles les molécules peuvent exercer leur effet toxique (à part certains éléments génétiques mobiles qui ont l'avantage de pouvoir être facilement amplifiés) ;
- les produits de dégradations et les produits métaboliques secondaires sont potentiellement inconnus.

Pour finir et en résumé, un simulateur d'ECA offrirait la possibilité de développer de nouvelles méthodologies et techniques permettant d'améliorer le traçage et d'approfondir la compréhension du comportement, du devenir d'éléments et de molécules évoluant au sein d'un écosystème, puis d'en évaluer les risques et d'en analyser les impacts sur les organismes dans un deuxième temps. Intéressons-nous maintenant à l'hypermonitoring de l'exposome, qui fait l'objet du prochain chapitre.

²³² Dans le cadre de MELISSA, l'exemple de contrôle qui correspond à ceci est le projet de monitoring en vol des gaz en trace ANITA (Analysing Interferometer for Ambient Air) : www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/International_Space_Station/ANITA_air_quality_monitoring_for_the_International_Space_Station (dernière consultation le 10.07.2015)

7.3.3.2 *L'hypermonitoring de l'exposome*

Exercer une biosurveillance de l'exposome d'un ECA consiste à monitorer quasiment en temps réel l'ensemble des conditions environnementales auxquelles sont soumises les organismes qui évoluent au sein de l'écosystème. Ceci fait appel à l'approche systémique discutée précédemment (§5.1.3.1), approche qui présuppose ici la mise en place d'une forme d'« hyperperception » de l'environnement. Il est en effet crucial d'identifier tout phénomène d'oscillation et de divergence catastrophique le plus précocement possible, afin de pouvoir plus facilement exercer une influence sur les paramètres de l'écosystème en appliquant au plus vite les contre-mesures appropriées en cas de dérive (§7.3.4.5).

Cet « hypermonitoring » de l'exposome porte essentiellement sur le traçage, l'étude du devenir des éléments et des molécules pénétrants et circulants dans l'ECA, et l'établissement d'une cartographie la plus exhaustive possible des conditions écosystémiques en présence, soit une photographie de la situation de l'ECA à un instant donné. Le risque analysé est le risque environnemental (ou écologique). Dans cette perspective, un simulateur d'ECA et d'habitat clos se profile comme une boîte à outils pour un le scientifique utile à :

- l'évaluation des risques environnementaux (§7.3.3.2.a) ;
- la détection via des systèmes d'alerte précoce (§7.3.3.2.b) ;
- la mesure des expositions biologiques, chimiques et physiques (§7.3.3.2.c) ;
- l'analyse de la distribution : bioaccumulation, dissipation et biotransformation (§7.3.3.2.d).

7.3.3.2.a Un outil d'évaluation des risques environnementaux

Un simulateur d'ECA joue premièrement le rôle d'outil d'évaluation des risques environnementaux, qu'ils soient écotoxicologiques, chimiques, microbiologiques ou encore génétiques. Les sujets et thématiques de recherche associés incluent :

1. L'identification et de l'évaluation des risques associés à la présence de polluants chimiques et biochimiques de l'environnement dans les ECA :

- de micropolluants et microcontaminants (p. ex : identification et effet de résidus de médicament contenus dans l'urine) ;
- d'oligo-éléments et de minéraux (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+ , etc.) ;
- de produits endocriniens (hormones) ;
- de produits pharmaceutiques ;
- de nanoparticules ;
- d'éléments génétiques mobiles (plasmides).

2. L'optimisation des équipements, dont ceux :

- de détection de radiations (exposome) ;
- de mesure d'effets biologiques (responsome) : biotests, bio-essais, biosenseurs, etc. (voir §7.3.3.1.a).

3. La définition des exigences pour le contrôle des risques pour les missions d'exploration humaines comprenant :

- l'identification des facteurs limitants et des problèmes critiques ;
- la définition de scénarii incluant les risques de morts, de maladies, d'accidents ou de pannes ;
- la définition de seuils de sécurité et d'hygiène pour la qualité de l'eau, de la nourriture et de l'air (adapté des valeurs de Spacecraft Maximum Allowable Concentration (James 2008)) pour des missions d'exploration.

4. Le développement de nouvelles procédures d'échantillonnage :

- de données environnementales issues de l'exposome : échantillons d'air, d'eau ou d'aliments ;
- de données sur la santé de l'homme : issues d'un biomarqueur (sang, transpiration, salive, urine, matière fécale, etc.) ou d'observations sur les comportements (aspects psychologiques).

5. la validation « sur le terrain » de procédures d'évaluation des risques, basée sur :

- la détermination de barèmes de risques cumulés (selon type d'exposition) :
 - risque sanitaire : monitoring de capital santé (maladies cardiovasculaires, maladies infectieuses, cancer, etc.) ;
 - risque environnemental : monitoring de l'effet de mélange de produits toxiques et micropolluants.
- l'évaluation de la criticité de chaque exposition²³³ ;
- la définition des valeurs limites d'immissions ou d'émissions cohérentes au vu des risques évalués (en termes d'écotoxicité, de neurotoxicité, etc.) ;
- l'observation effective que ce qui a été prédit se déroule ou non.

De telles procédures permettraient par exemple de tester la réponse de l'ECA au stress causé par l'administration d'un flux d'urine contenant les coproduits de la métabolisation de médicaments. En permettant ce type d'évaluation, de telles expérimentations permettraient de mieux comprendre et anticiper les risques environnementaux de l'ingestion par l'homme de produits bioactifs en système fermé.

²³³ La criticité est une valeur chiffrée qui se décompose habituellement en plusieurs paramètres comme la fréquence, l'effectif exposé, la gravité et le niveau de maîtrise, etc.

7.3.3.2.b Un outil de détection : systèmes d'alerte précoce

Comme évoqué précédemment, la notion d'hypermonitoring sous-entend le développement d'outils de détection de molécules présentes en très faibles concentrations, à l'image de micropolluants, contaminants, produits toxiques, etc. En outre, de tels systèmes doivent déclencher des alertes le plus précocement possible. Nommé « early warning detectors » dans la littérature anglo-saxonne, leur développement doit permettre de prévenir le plus en amont l'apparition de contamination ou de pollution environnementale (Erkman & Chèvre 2006). Leur intérêt étant aussi bien spatial que terrestre, ils peuvent aider à maintenir un environnement sain dans les bâtiments (logements) ou les lieux publics fréquentés (transports publics). De tels outils de détection peuvent également jouer un rôle important dans le contrôle de la diffusion de pandémie. Les thématiques et sujets de recherche associés à ces systèmes d'alerte précoce englobent :

1. Le développement de systèmes d'alerte précoce adaptés des tests d'écotoxicologie classiques, et utiles à l'identification en amont de micropolluants, de toxiques ou produits chimiques, de manière préventive et avant que les organismes ne subissent un risque. Leur optimisation devrait permettre :

- l'amélioration des seuils de détection des micropolluants et produits toxiques ;
- l'identification de biomarqueurs ou d'espèces bio-indicatrices pour établir que des populations ont été exposées à une pollution ;
- le développement de bio-indicateurs globaux, basés sur des organismes comme :
 - les bioreporters bactériens : des biosenseurs cellulaires bactériens (« whole cell bacterial biosensors », ou « cell-based autonomous biosensing microsystem »), fournissant une réponse biologique détectable après avoir été exposé à un micropolluant ou un cocktail de contaminants chimiques, réponse permettant d'avoir une idée sur la qualité de l'échantillon testé ;
 - les microcrustacés (daphnies), qui sont fréquemment utilisés dans les tests écotoxicologiques habituels pour mesurer la diminution de la demi-vie, l'effet sur la reproduction ou encore des effets génomiques ou protéomiques, suite à l'exposition à des polluants, etc. ;
 - les amphibiens : des tests comme *WatchFrog*²³⁴ sur des têtards de grenouilles permettent l'évaluation des risques environnementaux de produits chimiques, pharmaceutiques ou cosmétiques par une détection précoce sur des modèles amphibiens basés sur la biofluorescence *in vivo* (avec la protéine GFP).
- la détection des changements métaboliques induits par la pénétration de micropolluants et de produits toxiques dans les organismes ;

²³⁴ Site web de la technologie WatchFrog : www.watchfrog.fr

- le développement de test sur des espèces (« single species tests »), à l'image des tests cellulaires suivants :
 - l'essai YES pour la détection d'œstrogènes dans l'eau, et pour prévenir les perturbations endocriniennes sur des poissons, même à très faible concentration (Nakama et al. 2007) ;
 - le test Umuc : pour la détection précoce de génotoxicité (Escher et al. 2008).
- la validation sur des échantillons issus de l'environnement réel ou fournis par des compagnies pharmaceutiques ou agroalimentaires (§8.3.2.5) ;
- les domaines d'applications comprennent :
 - l'élaboration de contre-mesures de gestion environnementale pour des écosystèmes pollués par des micropolluants ou des résidus de médicaments (perturbateurs endocriniens). Applications pour le contrôle qualité des eaux de surfaces, de l'eau potable, de l'air, etc. ;
 - la modélisation de xénobiotiques dans les systèmes urbains ;
 - le développement de nouveaux produits chimiques, qui une fois relâché dans l'environnement, restent en conformité avec les exigences légales en les valeurs limites de missions et d'émissions dans l'air ou dans les eaux.

2. Le développement de systèmes et technologies de monitoring (physico-chimique) pour la détection de contaminants chimiques (mercure, ammoniac, méthanol, composés organiques volatiles) :

- par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier avec un sensing en phase gazeuse basé sur des diodes lasers ;
- par spectrométrie : 1) spectrométrie de masse quadripolaire avec ou sans chromatographie gazeuse ; 2) spectrométrie de mobilité ionique pour l'analyse chimique en phase gazeuse ;
- basés sur des nez électroniques. Domaines d'applications : détection de vapeurs d'aliments indiquant s'ils sont périmés ; lutte contre les infections nosocomiales : détection de souches pathogéniques dans les hôpitaux sur la base de la combinaison de composés organiques volatils qu'ils dégagent ; identification de contrefaçons alimentaires (authentification d'oeufs de pigeon²³⁵).

3. Le déploiement d'études pharmacocinétiques sur les effets et les impacts sur la santé des flux circulants dans les ECA (pharmacologie et toxicologie clinique), basées sur :

- des analyses de toxicité sur des voies métaboliques spécifiques ;
- des mesures pharmacocinétique de longue durée et en temps réel : détermination des effets

²³⁵ « Classifying birds' eggs: E-nose matches GC/MS performance », 15.09.2014, www.spectroscopynow.com/details/ezone/148603626ac/Classifying-birds-eggs-E-nose-matches-GCMS-performance.html?&tzcheck=1

secondaires indésirables de la prise d'agents antibiotiques, antibactériens, antifongiques, antiparasites, antiviraux, etc. ;

- le suivi thérapeutique de l'administration de médicaments : biomonitoring post-exposition de consommation de composés organiques volatils, d'aliments, etc. ;
- le développement de modèles toxicocinétiques basés sur des estimations des doses effectives reçues suite à l'exposition à un composé donné, à partir d'échantillons humains collectés.

4. l'élaboration et la validation de nouveaux protocoles de laboratoire et de modèles expérimentaux pour des tests de d'(éco)toxicité (relation dose-effet ou exposition-réponse d'un micropolluant) :

- basés sur des approches mono-espèce à l'échelle d'un « mésocosme » (§7.3.1.2), par opposition aux conditions de laboratoires classiques (court-terme, test effectué sur une espèce uniquement) ou à des campagnes de terrains (environnement plus complexe) ;
- intégrant un niveau de complexité suffisant (niveau d'organisation biologique élevé, ou du moins plus élevé qu'habituellement) ;
- incluant des processus cycliques et des phénomènes de variabilité propres aux écosystèmes naturels effectués sur des populations d'organismes et sur plusieurs espèces, dans des conditions ;
- plus proches de l'environnement réel d'écosystèmes naturels que celles rencontrées en laboratoire.

Les mésocosmes permettent d'effectuer des expériences en milieu contrôlé, qui ont démontré leur valeur dans la recherche en écologie scientifique par le passé (Beyers & H. T. Odum 1993), allant au-delà des approches purement analytiques et réductionnistes pour l'étude des propriétés fondamentales et des opérations se déroulant dans un système vivant.

7.3.3.2.c Un outil de mesure des expositions biologiques, chimiques et physiques

Un simulateur d'ECA permettrait d'étudier tout type d'expositions, que leur origine soit biologique, chimique ou physique. A titre d'illustration, il pourrait servir à l'établissement d'un modèle expérimental pour l'étude des nanoparticules. Ces dernières sont présentes dans un nombre croissant de produits consommés quotidiennement, par exemple dans les produits cosmétiques comme les crèmes solaires. Or, leur succès technologique a conduit à une large diffusion de ces composés dans l'environnement, à des concentrations auxquelles des effets écotoxicologiques sur de nombreux organismes terrestres et aquatiques peuvent se manifester (Ma et al. 2013). Comme il n'est pas si simple d'évaluer leur impact en amont, des écosystèmes aquatiques « de poche » tels que ceux du projet Mésonnet en France, ont été reproduits pour simuler de façon réaliste l'exposition d'organismes

constituant une chaîne trophique (Santaella et al. n.d.). Les chercheurs du groupement de recherche internationale iCEINT (International Consortium for the Environmental Implication of Nanotechnology)²³⁶ analysent quant à eux le comportement des nanoparticules dans des mésocosmes aquatiques afin de mieux appréhender et modéliser leurs effets sur les organismes. Ces écosystèmes recréés artificiellement sont en l'occurrence constitués d'aquariums de 80 litres bardés de capteurs. Alors que la plupart des études se focalisent sur l'exposition d'un type de nanoparticule à un organisme donné, dans un milieu plus ou moins représentatif d'une situation environnementale, les recherches dont il est question ici fournissent des données précieuses pour appréhender les impacts des nanoparticules et leurs mécanismes à l'échelle d'un écosystème. Ces informations portent tant sur les individus (stress oxydatif, bioassimilation, contamination des œufs et des individus nouveau-nés) que sur des communautés (bactéries et algues peuplant la colonne d'eau et les sédiments (Santaella et al. n.d.)).

Le simulateur d'ECA pourrait servir à tester différents scénarii, fonction des organismes en présence dans l'écosystème, qu'il s'agisse de producteurs (bactéries, algues) qui serviront de nourriture à des organismes aquatiques consommateurs (p. ex. zooplancton tels que daphnies, gammares) (Hao et al. 2012), eux-mêmes source d'alimentation d'autres organismes invertébrés. Il s'agirait tout d'abord de modèles expérimentaux effectués sans que l'homme ne soit initialement présent – ou du moins sans qu'il ne consomme une biomasse sans s'être au préalable assuré de sa non-contamination par de tels nanoparticules.

Concrètement, le démonstrateur d'ECA pourrait servir d'outil de mesure des expositions pour :

1. L'évaluation de l'exposition biologique chronique, comme :

- l'exposition aux micropolluants, aux biocides et aux autres contaminants lors des activités d'exploitation (récolte des plantes) et de maintenance des différents compartiments de l'ECA (Ratola et al. 2012) ;
- l'exposition aux micro-organismes (bactéries, champignons, virus, mycoplasmes, etc.), à des bioaérosols complexes (composés de micro-organismes, des endotoxines, des peptidoglycanes, des spores, des hyphes, etc.) et aux toxines (y compris mycotoxines) (De Middelée et al. 2019) : caractérisation de leur composition ; détermination des réactions inflammatoires et des effets cytotoxiques ; suivi de la réponse immunitaire après contact ou inhalation ;
- Domaines d'application : hygiène hospitalière, laboratoires de recherche, industries agroalimentaires.

2. L'évaluation de l'exposition chimique chronique, comme l'exposition à des dérivés réactifs de

²³⁶ Site web de iCEINT : www.i-ceint.org

l'oxygène et stress oxydants, afin de permettre :

- l'évaluation de l'influence des polluants organiques faiblement volatile sur la production d'espèces réactives de l'oxygène (ERO, également appelées « reactive oxygen species » / ROS en anglais) comme des radicaux libres, des ions oxygénés ou des peroxydes et autres composés chimiques instables et extrêmement réactifs dus à leurs électrons célibataires (« libres ») ;
- le suivi des effets de stress oxydants (endommagement de structures cellulaires : peroxydation lipidique membranaire, oxydation de protéines et de l'ADN, déclenchement d'apoptose ; endommagement de tissus : détérioration du collagène, rigidification des tissus), suite à l'exposition à des rayonnements ionisants ou UV et à des chaleurs élevées ;
- l'approfondissement de la compréhension des voies et des cascades métaboliques stimulées et/ou inhibées par des stress oxydatifs ;
- l'étude des effets de contre-mesures par l'administration in vivo de molécules antioxydantes : vitamine C, acide urique, glutathion, polyphénols, etc.
- Domaines d'application : lutte contre le vieillissement cellulaire (sénescence).

3. L'évaluation de l'exposition physique chronique, comme l'exposition à des longueurs d'onde spécifique du spectre de lumière solaire (UV, RX, etc.) : simulations 3D pour la prédiction de la dose et la distribution, selon les types de peau, les équipements de protections utilisés, les positions du corps durant les activités ;

4. L'évaluation de l'exposition chronique à des nanoparticules, afin de comprendre leur comportement de nanoparticules, et leur effet sur les organismes de l'écosystème et de modéliser la relation entre exposition et écotoxicité pour mieux prévoir cette dernière ;

5. L'étude des mécanismes d'induction de résistance et de réponse adaptative aux stress (radiations ioniques, stress oxydatifs, carence en certaines molécules) ;

6. Le développement de nouvelles méthodes et pratiques de médecine du travail, incluant :

- la modélisation de l'exposition et les voies d'exposition : pénétration par la peau, inhalation par voie orale, etc. ;
- l'identification de marqueurs d'effets sur la santé : indicateurs de santé, questionnaires d'évaluation ;
- la définition de nouvelles exigences QESS (qualité, environnement, santé et sécurité) pour des projets en conditions extrêmes dans le but de définir des valeurs et concentrations limites d'émissions dans les eaux, l'air, les nutriments, d'exposition chronique à des bruits élevés, etc. ;
- l'optimisation des conditions de travail : hygiène du travail, ergonomie, psychophysiologie.

7.3.3.2.d Un outil d'analyse de la distribution des micropolluants et contaminants

chimiques

Un démonstrateur d'ECA constitue également une plateforme de choix pour l'analyse approfondie de la distribution des éléments, des molécules et des composés d'un écosystème donné. L'étude des phénomènes de bioaccumulation (stockage dans un compartiment ou un organisme donné) et de dissipation (par dégradation ou biotransformation) y semble particulièrement pertinente.

Afin de pouvoir suivre l'accumulation de micropolluants, voire de particules radioactives dans des systèmes naturels clos, il est nécessaire de « tracer » scrupuleusement leur devenir, leur mouvement, leur dissémination, leur transformation et leur élimination (Nitta 2001). Cela implique la détection des contaminants chimiques pénétrants dans la boucle, aussi bien ceux issus de l'homme (hormones, médicaments), que ceux provenant de l'environnement (biocides, xénobiotiques). Comme toujours, l'intérêt réside dans la capacité d'un simulateur d'ECA à accélérer artificiellement la cinétique des molécules qui y circulent, y compris de celles qui ne sont pas désirées comme les micropolluants.

L'étude, la modélisation et le suivi des contaminations, tant chimiques que microbiennes, dans les systèmes clos semblent à même d'apporter de nouvelles données pertinentes pour la compréhension des systèmes environnementaux complexes. En combinant les systèmes de détection précoce (§7.3.3.2.b) et des outils d'analyse de la distribution de micropolluants ou de contaminants chimiques, les ECA pourraient présenter un intérêt majeur pour la gestion des polluants chimiques dans l'environnement, à l'image du monitoring continu de la qualité de l'eau (§7.4.2) ou de l'air (§10.5). En outre, de telles démarches semblent également appropriées pour le contrôle de la qualité de produits dans des usines de production de l'industrie pharmaceutique ou agroalimentaire (§8.3.1.3). Les thématiques et sujets de recherche en rapport avec cette exploration de la distribution des molécules de l'ECA comprennent par exemple :

1. Le déploiement d'études de toxicologie environnementale, d'écotoxicologie moléculaire, de biochimie environnementale, voire de nanotoxicologie améliorant notre compréhension du fonctionnement des cycles d'éléments (C, H, N, O, S, P, N, Na, K, etc.) et du devenir de micropolluants ou d'éléments en trace dans une boucle fermée. L'étude des processus de contamination, d'assimilation, de bioaccumulation, de biotransformation et de dissipation dans les systèmes clos nécessite en particulier :

- d'effectuer des bilans de masse ;
- d'évaluer les temps de résidence, des taux de dilution, de la distribution ;
- de vérifier la biocompatibilité des processus ;
- de suivre les processus d'amplification de toxicité ;
- d'étudier les processus chimiques intervenant dans la (bio)dégradation des polluants organiques ;
- d'identifier les produits de transformations des polluants en système clos : métabolites

secondaires, produits de dégradation, etc. ;

- de déterminer les molécules prioritaires à tracer ;
- d'analyser les interactions potentielles de toxiques.

2. Le développement et l'application de méthodologies, d'outils et de solutions permettant de contrôler les taux de variations de substances ou de composés, ainsi que leurs taux d'accumulation et de dissipation²³⁷ permettant à un ECA : d'améliorer son efficacité ; de diminuer ses pertes ; d'allonger la durée de vie des molécules désirées ; d'intensifier l'utilisation ; de réutiliser certains de ses composants ; de substituer les flux ; de réduire la demande en consommables.

7.3.4 Un régulateur de l'homéostasie des organismes et des écosystèmes

Dans la perspective « synergistique » du programme Oïkosmos, le démonstrateur de « LSS » devrait servir de « machine à poser des questions » sur les écosystèmes terrestres, plutôt que d'être une simple proposition (forcément prétentieuse) d'étendre le territoire conquis par l'homme à une colonisation progressive de l'espace. Intrinsèquement, il recèle bien sûr un excellent potentiel pédagogique direct pour questionner, observer, analyser et comprendre les phénomènes biologiques se déroulant dans les ECA, ainsi que les aspects liés à l'optimisation de son fonctionnement : fermeture des cycles, gestion globale de l'énergie, maximisation de sa durabilité, etc. Mais il devrait aussi mettre en lumière une série de frontières actuelles sur nos capacités scientifiques et technologiques, en permettant l'étude approfondie des processus se déroulant au sein de tout type d'écosystème en lien avec sa structure, sa dynamique propre (son évolution globale, mais aussi celle de ses organismes) et le cycle des éléments qu'il contient. Dans ce contexte, l'objet de ce chapitre est de discuter le potentiel d'un simulateur d'ECA pour l'étude de la régulation de l'homéostasie des organismes (§7.3.4.1), mais également de celle de leur écosystème (§7.3.4.2). Ensuite, nous verrons comment renforcer de la capacité d'adaptation aux changements des conditions écosystémiques (§7.3.4.3). En complément de ces thématiques visant à renforcer la capacité d'adaptation des écosystèmes à des changements constants, des mesures préventives seront proposées au §7.3.4.4. Enfin, le §7.3.4.5 proposera des exemples de mesures correctives (ou contre-mesures) pouvant être appliquées lorsque des perturbations sont suffisamment conséquentes pour mettre le système en péril.

²³⁷ L'intégrale de la différence entre les taux d'accumulation et de dissipation permet de calculer les stocks disponibles à un moment donné, soit la concentration totale des ressources/éléments/substances/composés. Cette quantité d'un élément donné va influencer les espèces de l'écosystème ou risquer de les endommager.

7.3.4.1 *L'homéostasie des organismes*

L'homéostasie est la capacité d'un système donné, qu'il soit ouvert, semi-ouvert, quasi clos ou fermé, à maintenir son équilibre de fonctionnement au sein d'un milieu qui le soumet à des perturbations et qui peut s'avérer en continuel changement. Le retour à l'équilibre en biologie – l'équivalent de la loi d'action de masse en chimie – se retrouve plutôt chez les eucaryotes, mais est aussi présent dans une certaine mesure chez les procaryotes. À l'échelle d'un organisme comme l'Homme, elle implique l'ensemble des mécanismes de stabilisation de ses différentes constantes physiologiques. Ces régulations résultent en particulier de l'action des hormones du système endocrinien qui influencent le rythme cardiaque et ventilatoire, la température, la glycémie, le pH sanguin, l'équilibre électrolytique, la balance hydrique, etc. Afin de décrire ces phénomènes de régulation de la stabilité des organismes, on parle généralement d'équilibre dynamique. Celui-ci est intimement lié à une régulation fine par des mécanismes de contrôle tels que :

- *des boucles de rétroaction positive* : des mécanismes dont l'activation accélère ou augmente l'effet créé par un stimulus initial, à l'image du renforcement de la sécrétion d'une hormone par une glande, déclenchée par les voies moléculaires de transduction du signal, après fixation de l'hormone en question à son récepteur ;
- *des boucles de rétroaction négative* : des mécanismes dont l'activation induit une réduction ou une inhibition de l'effet ou de l'activité d'un organe. À titre d'exemple, la régulation de la température est contrôlée par les sécrétions hormonales de l'hypothalamus qui cherche à abaisser la température aussitôt que celle-ci augmente (en stimulant la transpiration et le refroidissement du corps par évaporation de la sueur) ou qui vise à réchauffer le corps lorsque ce dernier devient trop froid (par une diminution de la circulation sanguine hypodermique – via une vasoconstriction – qui minimise les pertes de chaleur, et de manière couplée avec le frissonnement déclenché par l'activation d'une contraction musculaire sous-cutanée).

Un simulateur d'ECA place les organismes – et en particulier l'humain – au cœur des flux de matières, d'énergie et d'information, qui traversent, comme on l'a vu, un nombre élevé d'interfaces (§7.3.1.3). De surcroît, ces flux exercent sur l'homme une influence à tous les niveaux, tant en stimulant ou inhibant ses voies physiologiques, qu'en agissant sur sa flore intestinale, ainsi qu'en déclenchant des processus inflammatoires et des stress oxydatifs ou enfin en impactant sur son humeur et sa performance opérationnelle. En retour, il s'agit de pouvoir stabiliser ses différentes constantes physiologiques afin de maintenir l'homéostasie corporelle.

L'homéostasie des autres espèces d'un ECA est traitée indirectement aux §7.3.2 (optimisation de la performance de bioréacteurs microbiens) et §8.3.1.2 (physiologie végétale en conditions extrêmes).

L'écosystème dans son ensemble doit également s'autoréguler en fonction des variations des conditions

environnementales ou des éventuelles perturbations en présence, comme nous allons le voir au chapitre suivant.

7.3.4.2 L'homéostasie des écosystèmes

À l'échelle de l'écosystème, l'étude des déséquilibres homéostatiques de l'ECA dans sa globalité permet d'envisager des recherches portant sur :

- la stœchiométrie écologique (§7.3.4.2.a) ;
- la théorie du budget énergétique dynamique (§7.3.4.2.b) ;
- les successions écologiques artificielles (§7.3.4.2.c) ;
- l'écopoïèse artificielle (§7.3.4.2.d).

7.3.4.2.a La stœchiométrie écologique

La stœchiométrie écologique fait en référence aux interactions entre les métabolites de l'organisme et les nutriments entrant dans la composition chimique des aliments qu'il consomme (Sterner & Elser 2002). Initialement basée sur les travaux de Lotka (Lotka 1922; Lotka 1932), cette « homéostasie stœchiométrique » touche des domaines comme le recyclage des nutriments et la dynamique de population dans un écosystème, et présente l'intérêt de connecter la physiologie des organismes de l'écosystème avec leur réseau alimentaire (Olf et al. 2009). L'approche se focalise sur les interfaces entre le consommateur et sa nourriture et cherche à prévenir les risques de déséquilibre d'éléments clés au sein d'écosystèmes. Ces risques de mauvaises distributions revêtent une importance cruciale dans le cadre de système quasi clos, qui ne présentent pas toujours des réservoirs de ressources suffisants pour facilement supporter des déséquilibres de ratio d'éléments clés (comme le ratio C:N ou C:P). De par leur perspective systémique, les recherches portant sur cette thématique semblent donc pertinentes pour s'assurer de la juste répartition de la composition chimique totale en nutriments, tout comme de celles des autres molécules organiques et inorganiques au sein d'ECA.

Le §9.2.1 traitera la modélisation des bilans stœchiométriques.

7.3.4.2.b La théorie du budget énergétique dynamique

La théorie du budget énergétique dynamique (ou DEB, soit « Dynamic Energy Budget theory » en anglais) vise à identifier des principes quantitatifs liés à l'organisation du métabolisme d'organismes qui évoluent au sein des écosystèmes. L'étude de la théorie du DEB permet d'envisager des applications dans l'écotoxicologie des populations (Jager et al. 2013). Elle fait appel à une approche dynamique, en

raison de la variation de leurs budgets en ressources matérielles et énergétiques, c'est-à-dire à l'évolution des « réserves » de l'organisme, synthétisées à partir de l'alimentation et nécessaires aux activités de maintenance, de croissance, de maturation et de reproduction des organismes. Ces réserves jouent d'ailleurs un rôle tampon essentiel en cas d'indisponibilité momentanée de ressources. Les thématiques et sujets de recherche incluent le suivi de l'évolution des réserves des organismes pour chacun des systèmes de molécules (lipides, protéines, etc.) : en fonction des perturbations de l'exposome (§7.3.3.1.a) ; à différents stades de croissance des organismes (juvénile, mature, etc.) en particulier pour les espèces végétales (§7.3.4.2.c) ; après inclusion de nouvelles sources de nutriments ; selon les taux d'excrétion de déchets par d'autres organismes.

D'autre part, chez les organismes exposés à des microcontaminants, cette théorie du DEB permet de mieux appréhender l'interconnexion des mécanismes qui, une fois induits par les perturbations, impactent l'acquisition de leurs ressources énergétiques via l'alimentation. Par voie de conséquence, ils peuvent faire varier la croissance des individus, ou influencer leur taux de reproduction (Kooijman 2009). L'enjeu est donc bien d'anticiper les retombées et les effets de ces perturbations de l'exposome sur le long terme (§7.3.3.1.a), voire sur plusieurs générations selon les espèces.

7.3.4.2.c Les successions écologiques artificielles

D'une certaine manière, le développement initial d'un ECA peut être assimilé à celui de « successions écologiques artificielles », à l'image des processus naturels de croissance et d'évolution des écosystèmes (E. P. Odum 1969) d'un stade juvénile à un stade mature appelé « climax » (Clements 1916; Clements & Shelford 1930; Clements 1936). D'ailleurs, l'écotransition de l'écosystème industriel présentée au §6.2.3 s'inspire de cette maturation d'écosystèmes biologiques menant par exemple à la « forêt climacique », avec pour objectif principal de rendre son fonctionnement plus compatible avec celui des écosystèmes naturels. Une plateforme expérimentale comme un simulateur d'ECA offre l'opportunité de caractériser chacun des stades de développement d'un écosystème monter de toutes pièces et associant des organismes en étroite interaction. L'étude approfondie des phases d'exploitation (naissance de l'écosystème et colonisation par les organismes après inoculation des premières souches dans les bioréacteurs ou par celles de cultivars des premières plantes de l'ECA), puis de conservation (phase de croissance de la biomasse dans les différents compartiments), doit mener l'ECA jusqu'à un état de maturité, l'équivalent en quelque sorte d'un climax manipulé artificiellement, en évitant un vieillissement prématuré (sénescence) ou non désiré de l'écosystème.

Un équilibre dynamique doit être atteint dans l'ECA pour qu'il puisse déployer l'ensemble de ses fonctionnalités (§4.2.1.2), après avoir accumulé suffisamment de biomasse et de résilience en augmentant les interconnexions de l'écosystème (§7.3.4.3.a). Il s'agira alors d'explorer les conditions idéales – compte tenu des contraintes drastiques en présence – pour atteindre progressivement ce stade

de maturité, ou simplement de vérifier la possibilité même de le faire, et les moyens pour le maintenir durablement. Le simulateur d'ECA pourrait ainsi permettre de suivre attentivement les variations de la capacité d'adaptation aux changements et de la vulnérabilité d'écosystèmes avec le temps (§7.3.4.3), en fonction de configurations choisies des conditions écosystémiques.

D'autres pistes de réflexion sur une théorie du climax appliquée aux ECA pourraient être menées dans le cadre du programme Oïkosmos. À titre d'exemple, afin de mieux comprendre les phénomènes d'oscillation des écosystèmes, des perturbations volontaires des ECA, et suffisamment fortes et soutenues pour induire son effondrement, pourraient être testées. La mort résultante d'une partie des micro-organismes et de plantes serait alors à même de libérer des molécules permettant aux cellules et aux organismes ayant survécus de renouveler et réorganiser le système, et ce de manière aiguillée ou non par l'homme. D'intéressantes études sur les cycles adaptatifs et sur la destruction créatrice appliquées aux ECA semblent envisageables (Holling 1986; Holling 2001; Holling et al. 2002), afin notamment :

- de connaître les limites de l'optimisation de sa performance opérationnelle (§7.3.2 sur l'optimisation des cultures en (photo)bioréacteur) ;
- de développer des systèmes de backup les plus réactifs et efficaces possibles (§7.3.4.3.c sur l'architecture massivement parallèle) ;
- de pouvoir prévenir tout écroulement du système (§7.3.4.4 sur les mesures préventives) ;
- de mieux rebondir en cas de crash non déclenché délibérément (§7.3.4.5 sur les contre-mesures).

7.3.4.2.d L'écopoïèse artificielle

Ensuite, l'étude d'ECA au sein d'un démonstrateur pourrait représenter un premier pas vers une « écopoïèse artificielle », telle que définie par le Prof. Robert Haynes, un biophysicien canadien pionnier des réflexions sur la terraformation (Haynes 1993). Par « écopoïèse », Haynes désigne « la fabrication d'un écosystème durable sur une planète initialement stérile et sans vie ». À ce titre, il ne s'agit ici que d'étudier une des phases initiales de la terraformation (Beech 2009), sans volonté de vouloir ensuite influencer de quelque manière les processus (bio)géo-chimiques à grande échelle d'une planète comme Mars. La terraformation soulève bien évidemment des enjeux éthiques immenses (Fogg 2000) qui vont au-delà de ceux liés à la « simple » visite de l'homme sur Mars en compagnie de quelques équipements, robots et véhicules, car elles passent par l'accomplissement d'une géo-ingénierie à grande échelle qui viserait ultimement à permettre le déploiement d'une abondante vie végétale à même de produire suffisamment d'oxygène pour rendre – à très long terme – les conditions atmosphériques compatibles avec la vie d'organismes aérobie stricte, comme l'homme (Haynes 1990; Fogg 1995).

Les ECA tels que ceux faisant l'objet cette étude ambitionne de permettre ultimement à l'homme de

vivre quelques mois/années sur Mars, avec en ligne de mire une potentielle colonisation à long terme, mais à une bien plus petite échelle (McKay et al. 1991). Une éco-poïèse artificielle plus « terre à terre » pourrait toutefois se dérouler tout d'abord au sein d'un simulateur d'ECA puis se développer dans le cadre d'une base martienne (Taylor 1998). Afin de pouvoir la réaliser, une recherche approfondie dans le domaine de l'écologie scientifique est indispensable, à l'image de celle proposée par le programme Oïkosmos.

7.3.4.3 Le renforcement de la capacité d'adaptation aux changements des conditions écosystémiques

Ce chapitre aborde les aspects vis-à-vis desquels nos savoirs et connaissances sur les écosystèmes semblent encore insuffisants, alors que certains sont au cœur des écosystèmes réels, à savoir :

- la résilience (§7.3.4.3.a) ;
- la « prévision aveugle (§7.3.4.3.b) » ;
- l'architecture « massivement parallèle » (§7.3.4.3.c) ;
- l'autoréparation (§7.3.4.3.d).

7.3.4.3.a La résilience

On peut définir la « résilience » d'un écosystème ou d'un organisme comme sa faculté à recouvrer un fonctionnement normal après avoir été soumis à une perturbation. La littérature sur les cycles adaptatifs conceptualise la résilience des écosystèmes face aux changements de conditions environnementales (Holling 1986; Folke et al. 2004; Holling et al. 2002; Holling 2001).

Si l'écologie scientifique est parfois considérée comme la « science des équilibres », qu'en est-il de l'écologie industrielle ? Les ECA pourraient bien être un vecteur d'amélioration de la gestion des ressources et des déchets de l'écosystème industriel, et servir d'outil pour étudier les équilibres liés aux flux de matières circulant dans le système socio-économique. Un projet tel qu'Oïkosmos devrait aider à définir, évaluer et concevoir des écosystèmes durables – qu'ils soient artificiels, naturels ou industriels – c'est-à-dire capables de s'accommoder aux changements permanents du milieu externe ou interne. Dans tous les cas, la robustesse d'un ECA aux variations des conditions écosystémiques est un élément fondamental de la régulation de son homéostasie (Pechurkin 1998).

Dans le cadre d'un démonstrateur d'ECA, l'application des principes de résilience (Wardekker et al. 2010) l'étude de la capacité d'adaptation aux changements des écosystèmes naturels et/ou industriels pourrait permettre :

- de jouer sur l'effet tampon en disposant d'une capacité d'utilisation et de stockage

volontairement surdimensionnée pour certaines ressources, afin d'éviter de dépasser les seuils critiques lors de perturbations du système (§7.3.4.3.b) ;

- d'optimiser l'exploitation des ressources ayant un taux rapide de déplacement dans le système ;
- de déterminer les effets seuil des flux et volumes de l'ECA et développer progressivement de nouvelles fonctionnalités, en cas de surplus de biomasse disponible. Par exemple le bioraffinage d'excès de biomasse non comestible (§7.4.4) permettrait de passer d'une écologie « artisanale » à une écologie industrielle ;
- de favoriser l'omnivorie, en réduisant la vulnérabilité du système par la diversification des solutions à disposition pour traiter les déchets, ou par le développement de voies alternatives de valorisation de la biomasse non comestible (voir également §7.4.4) ;
- de recourir à une redondance des fonctions, afin de favoriser la présence de voies multiples pour accéder à une ressource, grâce à des procédures, des techniques, des alternatives et des systèmes de backups. La « prévision aveugle » et l'architecture « massivement parallèle » sont deux stratégies allant dans ce sens. Elles sont décrites ci-après aux §7.3.4.3.b et §7.3.4.3.c ;
- d'effectuer des expériences de biodiversité combinatoire, afin de tester les contributions relatives des espèces individuelles dans les phénomènes de résistance et de résilience selon les combinaisons d'organismes en présence dans l'ECA (et leurs stades de développement respectifs) (Naeem 2002).

7.3.4.3.b La prévision aveugle

La « prévision aveugle » consiste à accumuler non seulement de simples réserves (en énergie ou en matériaux), mais des gammes de systèmes alternatifs. L'efficacité de ces systèmes ne peut être prévue, mais leur diversité renforce la probabilité d'une adéquation fortuite de l'un ou de l'autre avec de nouvelles conditions extérieures. Dans le vivant, les exemples les mieux connus sont d'une part l'allélisme (accumulation au sein d'une population de multiples variantes d'un même gène) ; d'autre part, la formation du répertoire immunologique par recombinaison génétique aléatoire et formation d'une librairie d'anticorps « potentiellement utiles ». Parmi les exemples de thématiques et sujets de recherche envisageable, en rapport avec les ECA, citons par exemple l'étude d'un « allélisme informatique » pour la gestion de systèmes de support-vie. Une série de systèmes d'exploitation (« operating systems » ou « OS » en anglais) seraient mis en compétition, mais toujours conservés en réserve, améliorant la gestion d'ECA en cas d'éventuels « accidents » (voir §9.2 sur les sciences computationnelles). Une dynamique évolutive pourrait être ajoutée par la survenue de modification pseudoaléatoire de lignes d'instructions dans le stock d'OS. Des applications industrielles pourraient être envisagées dans la résilience des systèmes cybernétiques.

7.3.4.3.c L'architecture massivement parallèle

Dans un ECA, tous les sous-systèmes sont importants, car s'il l'un d'eux fait défaut, le système entier peut s'effondrer. D'une manière ou d'une autre, tous les sous-systèmes ont la même capacité de nuisance en cas de déficience. En cas d'avarie, les besoins de base à garantir dépendent des délais de régénération respectifs, allant de quelques minutes pour des gaz comme l'oxygène à quelques jours, voire semaines, pour la nourriture provenant de cultures végétales.

L'architecture « massivement parallèle » se distingue de la prévision aveugle par l'utilisation simultanée de systèmes distincts dans un but d'optimisation immédiat. Contrairement à l'acception informatique (ordinateurs comportant de multiples processeurs fonctionnant en parallèle), on entend ici le co-fonctionnement de dispositifs partiellement ou totalement différents, mais de même finalité. D'une manière un peu provocante, on pourrait dire qu'un écosystème naturel est une machine massivement parallèle (en individus et en espèces) dont la finalité, à la fois globale et individuelle, est l'accélération de l'augmentation de l'entropie universelle. Un ECA, en plus de l'inévitable entropie, doit générer des services et produits destinés à des humains. Le cœur de la problématique d'une architecture massivement parallèle découle de la dynamique « compétition / coopération » entre les systèmes présents, qui font appel à des boucles de rétroactions positives et négatives décrites au chapitre §7.3.4.1. Dans un écosystème naturel, ces deux tendances concourent au but entropique (quoique pas forcément avec la même efficacité). Dans un système de support-vie biologique, les inévitables phénomènes de compétition auront probablement des répercussions négatives, mais pas forcément !

De manière générale, les agences spatiales prévoient au minimum deux systèmes de « backup » lors de missions présentant de tels risques (« fail operational, fail safe », selon l'adage de l'ancien astronaute suisse de l'ESA, le Prof. Claude Nicolier) (Salotti & Suhir 2014). Une redondance de fonction dans les ALSS peut se créer en installant deux systèmes différents, biologiques ou physico-chimiques, fonctionnant dans le meilleur des cas en parallèle et partageant les fonctions de régénération de l'environnement humain. En cas de détérioration de la performance, voire de disparition d'un des deux systèmes, le second doit être en mesure, par redondance et en augmentant ses flux de consommation et de production, de compenser les pertes (Sychev et al. 2003). Il semble difficile de tripler en permanence l'ensemble des fonctions de l'ECA. Toutefois, la stabilité systémique pourrait être basée sur des technologies alternatives redondantes, comme un projet de la NASA de murs d'eau pour l'habitat, servant de réserve d'eau, et pouvant être utilisée pour la production de nourriture et la protection des radiations spatiales (M. M. Cohen et al. 2012). Certaines technologies pourraient être activées uniquement en cas de besoin, par exemple lors de l'apparition d'un problème majeur pour l'un des autres sous-systèmes. Le développement de tels stratégies de backup passe par la restauration de compartiments via des processus aussi compacts, économes en énergie et rapides que possible. La réactivité de la mise en fonction des contre-mesures doit être optimale (§7.3.4.5), mais il est évident que le « redémarrage » des (photo)bioréacteurs ou de cultures de plantes ne pourra s'opérer aussi rapidement

que certains systèmes de backups physico-chimiques.

L'ajout de nouvelles espèces apporte des fonctions supplémentaires et complémentaires à celles en place, ou alors duplique certains services de l'ECA pour qu'ils gagnent en volume. Les thématiques et sujets de recherche incluent l'étude des avantages et inconvénients d'une série de co-cultures microbiologiques par rapport à des cultures axéniques de référence. Ces essais peuvent s'inscrire dans la production (simultanée ou non) de différents services de l'ECA, par exemple l'épuration des eaux usées, le recyclage « atmosphérique », la production de compléments alimentaires, etc. Dans cette perspective, l'architecture massivement parallèle permettrait de compenser partiellement la biodiversité limitée des ECA. Pour la sélection des nouveaux organismes, les meilleurs candidats identifiés sont introduits dans l'ECA pour tester leur comportement et effet dans la boucle. De nouveaux compartiments pourraient être intégrés, basés sur des espèces telles que :

✧ *d'autres micro-organismes pour optimiser les rendements de boucle de valorisation des déchets solides.* Il s'agirait ici de l'intégration de micro-organismes dotés de fonctions comparables à ceux de la flore des ruminants et des rongeurs pour la digestion du contenu lignocellulosique (§7.4.4).

✧ *d'autres micro-organismes comestibles.* Le développement et la production de nouvelles sources de nutriments, comme des « single cell protein » (SCP, ou « protéines d'origine unicellulaire ») extraites de cultures de micro-algues (cyanobactéries), de bactéries, voire également de levures et de champignons. De tels micro-organismes comestibles pourraient devenir une source de protéines d'origine unicellulaire, le contenu protéique représentant de l'ordre de 50% de leur matière sèche (Nasseri et al. 2011). Les SCP pourraient ainsi substituer les protéines issues de l'alimentation animale et représenter un complément alimentaire intéressant (Alloul et al. 2019). Leurs biopolymères pourraient quant à eux permettre la synthèse d'emballage alimentaire ou d'autres matériaux. De plus, ils présentent l'intérêt de permettre potentiellement de diminuer la surface des serres.

Une les souches les plus pertinentes identifiées, l'enjeu réside dans l'acceptation de l'ingestion par l'équipage de tels produits à des fins alimentaires. S'il est déjà habitué à s'alimenter avec des plantes issues dont une partie du contenu ou des solutions nutritives provient directement des déchets qu'il excrète, reste encore à lui donner envie de manger une nouvelle nourriture non conventionnelle pour la plupart des pays occidentaux. Parmi les caractéristiques requises, relevons donc la nécessité de développer des SCP dotés d'un goût et d'une saveur agréable, mais présentant également de bons rendements de croissances lors de leur culture, un faible nombre de coproduits, des coûts de production modérés, et des processus aisés de préparation de la nourriture. Il semble possible d'appliquer des techniques équivalentes à celles développées pour les (photo)bioréacteurs et de développer des unités de production aussi automatisées que possible. La spiruline est un exemple classique et bien documenté de SCP (Habib 2008), en particulier en ce qui concerne l'évaluation de son potentiel nutritionnel (Moreira et al. 2011). Rien de surprenant donc qu'elle soit utilisée de longue date dans des ECA tel que

MELiSSA, comme nous l'avons vu au §4.2.1.2.e.

✧ *des levures*. Voir le projet FOOD (§4.2.1.3.c) (Rivas et al. 2000).

✧ *des champignons*. Des études sur les ECA ont cherché à capitaliser sur le bioprocessing par une relation proie-prédateur avec un champignon (dans sa phase amibe) et une bactérie, couplé à l'utilisation de cellulose et la production de champignons comestibles (Benjaminson et al. 1998).

✧ *des protozoaires*. Les bactéries de la rhizosphère ont un meilleur rendement en présence de certains de ces animaux unicellulaires (amibes, ciliés, flagellés, etc.) qui influencent par exemple la sécrétion hormonale des plantes (auxine, cytokine, etc.) (Krome et al. 2009) ou stimule la croissance de bactéries nitrifiantes (Alphei et al. 1996). L'introduction de microcosmes (§7.3.1.3) avec des contenus variés en protozoaires permettrait l'étude des phénomènes liés à leur survie des plantes sans leur microfaune associée ou l'optimisation de la croissance de plantes en fonction de leur rhizosphère.

✧ *des invertébrés*. L'addition de cultures de microcrustacés pourrait aider à optimiser le traitement des déchets organiques contenu dans les eaux noires (voir le §10.3 sur les habitats autosuffisants). L'ensemencement de certaines espèces d'insectes pourrait offrir un apport protéique intéressant, comme avec les vers à soie (Y. Yang et al. 2009; E. Hu & Liu 2010) ou les vers de farine (L. Li et al. 2013).

✧ *des espèces animales*. L'intérêt de la nourriture animale réside principalement dans la source de protéines, d'acides gras essentiels et de vitamines qu'ils peuvent procurer aux membres de l'équipage. Toutefois, l'introduction ajoute clairement un degré supplémentaire – et considérable – de complexité. Cette dernière est liée aux animaux eux-mêmes, à leurs habitats, mais aussi aux moyens destinés à leur abattage et découpe. Si l'élevage de moutons et de poulets a permis la consommation de viande et d'œufs durant les campagnes du projet *Biosphere 2* (§4.1.4), c'est avant tout grâce à l'immensité des volumes à disposition. Historiquement, les précieuses surfaces dédiées à la culture de plantes dans les ALSS de tailles réduites n'ont pas été utilisées pour nourrir des animaux (et produire de la viande), notamment en raison des déchets qu'ils produisent durant leur croissance et au temps d'équipage conséquent à consacrer à l'exploitation d'espèces animales. En termes de biosécurité, les risques sanitaires impliqueraient des mesures de précaution tout aussi élevées pour les animaux élevés que membres de l'équipage humain, et des coûts supplémentaires. En outre, l'agrandissement de l'ECA nécessaire à l'élevage engagerait des ressources énergétiques importantes réduisant significativement la performance énergétique globale.

Néanmoins, si des animaux pouvaient consommer quasi uniquement les parties non comestibles des récoltes végétales, leur introduction pourrait s'avérer intéressante. Des espèces de petite taille et présentant des temps de génération et des cycles de vie relativement courts devraient probablement être sélectionnées en priorité. Les systèmes d'aquaculture et de pisciculture semblent les sous-systèmes plus prometteurs pour une production animale, avec une autonomie intéressante au sein de l'ECA (Slenzka 2002; Bluem & Paris 2002; L. H. Levine et al. 2003; Gonzales 2009). Toutefois, l'élevage de poissons

est synonyme d'apport nutritif relativement faible avec des contraintes supplémentaires comme la création de zones d'ombre pour l'éclairage, production de déchets organiques.

En conclusion, se limiter à une composante biologique animale unique, liée à l'espèce humaine, semble offrir de nombreux avantages par rapport à l'introduction d'animaux, comestibles ou non. Pour l'exploration spatiale humaine, une telle simplification paraît ainsi presque inévitable, ou du moins initialement, en particulier pour les vaisseaux spatiaux ou les toutes premières bases planétaires.

7.3.4.3.d L'autoréparation

L'autoréparation est omniprésente au sein des systèmes vivants : de la molécule d'ADN à l'écosystème entier, tout est constamment réparé. Ces réparations peuvent s'opérer très ponctuellement (par excision des dimères de thymine dans l'ADN) ou par sacrifice et remplacement (par apoptose cellulaire). Récemment, l'invention de polymères autoréparables (White et al. 2001) ou de surfaces autonettoyantes (Wong et al. 2011; Nakajima et al. 2000), représentent les premiers pas dans cette direction dans l'écosystème industriel.

La culture de micro-organismes en milieu liquide est limitée par la problématique des biofilms, car la salissure des zones transparentes réduit, puis détruit la viabilité du système. La mise au point d'un autonettoyage de telles surfaces serait un thème de recherche aux applications industrielles immédiates et prometteuses. Le §10.2 illustre quelques-uns des matériaux avancés dont pourrait largement bénéficier un simulateur d'ECA.

7.3.4.4 Le déploiement de mesures préventives

En complément des éléments préalablement discutés, un simulateur d'ECA se profile comme un vecteur pour le déploiement de mesures préventives visant à minimiser – et même si possible à éviter – tout impact négatif à même de déséquilibrer l'homéostasie de l'écosystème. Les thématiques et sujets de recherche associés à l'élaboration de moyens de réduire les risques opérationnels comprennent :

1. Le développement de méthodologies, de procédures de test et de nouveaux standards de prévention de contaminations biologiques ou microbiennes (air, eau, alimentation), de contaminations chimiques ou de réduction du risque de biocorrosion.

2. La conception et utilisation de nouveaux produits et services :

- minimisant ou rendant inoffensifs la dispersion et la dissipation de contaminants biologiques et chimiques, et renforçant la prévention des effets potentiellement (éco)toxiques ;
- minimisant l'utilisation de composés nocifs pour l'environnement dans les phases

d'écoconception des instruments et appareillages utilisés dans le simulateur d'ECA.

3. La préparation aux situations d'urgence :

- développement et tests de procédures de réponse en cas de panne, d'accident, de défaillance ou du décès d'un membre de l'équipe, afin de limiter les impacts sur l'environnement, la santé et la sécurité de l'ECA ;
- consolidation de systèmes de gestion de la sécurité : monitoring en continu des fonctions et des activités critiques (production d'énergie, de climatisation, de détection d'incendies, de détection de vapeurs toxiques, de systèmes de télécommunications) ;
- développement d'équipements de protection : design de vêtements de protection de produits irritants (peau, yeux, organes respiratoires, audition, etc.) ; design de tissus de haute protection pour la prévention des risques thermique, chimique (gazeux et liquide), biologique, abrasion et coupure. Domaines d'application : industrie de la protection et de la sécurité (catastrophe naturelle, pompiers, policiers, etc.).

4. Le développement de stratégies, méthodes et protocoles : de procédure de maintenance ; de stérilisation ; de nettoyage ; de prévention des accidents ; de manutention sécurisée d'échantillons ; et d'isolation d'agents pathogènes.

7.3.4.5 *L'application de mesures correctives (contre-mesures)*

La détection précoce de perturbations de l'ECA ne signifie pas toujours que la dérive de l'écosystème puisse être systématiquement corrigée par sa résilience intrinsèque, ou celle de ses organismes. Une intervention extérieure devient alors nécessaire pour réguler le système via une mesure corrective et le faire revenir à l'équilibre. Cette contre-mesure va influencer le paramètre ou le compartiment impacté par la déstabilisation déployée, de sorte à catalyser par exemple un retour à une concentration ou à un état « normal », à un niveau optimal pour le bon fonctionnement de l'ECA.

Une fois détectés, les déséquilibres environnementaux doivent être analysés afin d'identifier leur source et leur amplitude. Il s'agit ensuite de déterminer si la perturbation va exercer une influence négative ou a déjà induit un changement suffisamment grand qui risquerait d'endommager la santé des organismes de manière irréversible à court, moyen ou long terme. Lorsqu'un certain seuil de risque est dépassé, la contre-mesure pertinente est appliquée dans les plus brefs délais. Il faut en outre veiller à ce que ces rétroactions contrant les perturbations n'induisent pas en retour des effets rebonds, c'est-à-dire des effets secondaires pervers pour le fonctionnement de l'ECA, par exemple lorsque le manque d'un consommable est compensé par un surplus de ce dernier, qui peuvent s'avérer tout aussi dommageables de ce dernier pour le système.

Les mesures correctives concernent aussi la correction de pannes, le retour à la normale après un

accident ou encore les stratégies de lutte contre les incendies et leur nettoyage après suppression.

Le déploiement de contre-mesures repose par exemple sur le développement et le test préalable de nouvelles méthodologies et technologies de traitement et de suppression des contaminants basées sur la microbiologie environnementale ou la phytoremédiation (phytoextraction, phytodégradation ou phytostabilisation) pour biotransformation durable des déchets contenus dans les sols ou les eaux, comme les polluants organiques et inorganiques ou les métaux lourds. Les domaines d'application connexes comprennent l'assainissement des sites contaminés, ainsi que le traitement des eaux usées et celui des déchets organiques solides.

Finalement, des contre-mesures sont également à même de cibler certains phénomènes de bioaccumulation à l'image de ceux discutés au §7.3.3.2.d.

7.4 Le développement de systèmes de recyclage hautement efficaces (recyclage intégral)

Avec un pilotage fin de son fonctionnement et à un hypermonitoring de ses conditions écosystémiques (§7.3), un ECA a pour ambition ultime le recyclage « intégral » des déchets générés par son exploitation. Ce chapitre cherche à montrer comment le programme Oïkosmos pourrait participer au développement de systèmes de recyclage hautement efficaces, et positionner le démonstrateur d'ALSS en tant que :

- moteur du développement d'écotechnologies (§7.4.1) ;
- installation de traitement décentralisé des déchets organiques (§7.4.2) ;
- dispositif expérimental pour la valorisation chimique et biochimique du dioxyde de carbone (§7.4.3) ;
- plateforme pour le bioraffinage (§7.4.4).

7.4.1 Un moteur du développement d'écotechnologies

Dans le contexte d'Oïkosmos, le développement d'un système de recyclage quasi intégral implique de facto l'usage d'écotechnologies. Toutefois, une valorisation *systematique* des émissions dans l'air, des rejets dans les eaux et des déchets solides de l'ECA n'est envisageable qu'en combinant judicieusement les bonnes cleantech pour améliorer significativement la performance environnementale globale de l'ECA.

Dans un habitat clos comme le simulateur d'ECA, il n'est pas possible de tricher avec les stocks de ressources à disposition (§6.1.4), les ressources étant souvent présentes en quantités limitées. Cela confronte les chercheurs à une gestion rigoureuse des ressources matérielles et énergétiques, qui seront rapidement épuisées si des stratégies adéquates de bouclage de flux de matières ne sont pas mises en œuvre, avec le risque de mettre en péril la pérennité du système à court ou moyen terme. Le suivi minutieux d'un ECA offre l'opportunité unique de visualiser en temps réel les variations effectives des ressources disponibles dans les différents réservoirs de l'écosystème, facilitant un dimensionnement adéquat et une circularisation optimale des flux.

L'ambition qu'un simulateur d'ECA devienne un moteur pour l'étude, le développement et le test de technologies réellement « propres » sous-entend d'appliquer des principes comme la production propre et l'éco-efficience (§6.2.2) et de s'appuyer sur les concepts, les stratégies, les méthodologies et les outils de l'écologie industrielle (§7.2), afin de mettre en œuvre une gestion intégrée et durable des ressources.

En s'inspirant de la capacité de la Biosphère à boucler ses principaux flux de matières, l'exploitation d'un simulateur d'ECA paraît prompt à démontrer les limites des pratiques de recyclage actuelles. Au sein d'un ECA, la rhétorique de la société de consommation, dans laquelle est avancée l'abondance de

biens matériels, avec des assertions telles « vivre sans limites », « no limits » ou « zéro carbone » n'a pas lieu d'être, les ressources y étant par définition archi limitées. Impossible de promettre systématiquement une compensation décalée dans le temps des émissions de CO₂ issues de la consommation d'énergie basée sur la biomasse. La gestion à court terme du gaz carbonique est en effet bien trop importante pour le fonctionnement de l'ECA, qu'il soit un entrant (photosynthèse des plantes) ou un sortant de réactions (bio)chimiques, sauf s'il intègre des technologies de valorisation du dioxyde de carbone, en particulier dans un contexte martien (§7.4.3). Les technologies « disruptives » comme cette valorisation du CO₂ à grande échelle et encore la bioraffinerie sont traitées aux §7.4.3 à §7.4.4. La régénération de l'air est discutée dans la perspective de l'habitat sain (§10.5).

La prochaine section s'intéresse à l'application des écotecnologies issues des travaux sur les ECA dans le cadre du traitement décentralisé des effluents urbains.

7.4.2 Une installation de traitement décentralisé des déchets organiques

L'application de l'écologie industrielle n'est pas un phénomène complètement nouveau, cela fait longtemps que les entreprises cherchent à boucler les flux de matières en favorisant les échanges de flux de matière lorsque l'intérêt économique est flagrant (Erkman 1997). Comme mentionné auparavant à plusieurs reprises, l'enjeu consiste aujourd'hui à systématiquement passer en revue les possibilités de valoriser les déchets des acteurs de l'écosystème industriel en ressources, matérielles et/ou énergétiques, ce que la Biosphère met en œuvre par l'intermédiaire de la chaîne alimentaire et des réseaux alimentaires (avec ses organismes producteurs ou consommateurs, ses herbivores, ses carnivores ou encore ses décomposeurs).

Les déchets organiques forment une part importante des déchets liés aux activités humaines, ils proviennent par exemple des parties non comestibles des plantes, des excréments humains (effluents urbains), des effluents agro-industriels ou encore du lisier. Les déchets organiques des ECA appartiennent essentiellement aux deux premières catégories, même si certains flux issus des bioréacteurs peuvent être assimilés à la troisième.

La valorisation des effluents urbains fait l'objet du présent chapitre, qui va tout d'abord présenter les enjeux d'un traitement décentralisé des eaux usées en démontrant le potentiel de la valorisation de l'urine tant dans le contexte terrestre (§7.4.2.1), que pour celui des ECA (§7.4.2.2).

La valorisation de la biomasse des parties non comestibles des plantes par bioraffinage sera discutée au §7.4.4. L'intérêt d'une application du concept de fermes verticales, en particulier la possibilité de coupler les procédés d'« agriculture artificielle » (§8.3.1.2) avec une épuration des eaux usées urbaines, sera quant à lui exploré plus en détail dans la partie dédiée aux habitats « autosuffisants » (§10.3).

7.4.2.1 *La valorisation de l'or jaune contribue à un écosystème urbain durable*

La caractérisation de la composition chimique des eaux usées – en particulier celles des effluents urbains, de boues d'épuration et des eaux de surface – a fait l'objet d'un grand nombre d'études ces dernières décennies (De Feo et al. 2010; Lofrano & J. Brown 2010). Elles ont notamment porté sur l'identification de polluants et l'évaluation de l'efficacité de leur suppression. La prise de conscience sur l'existence de micropolluants – des substances bioactives comme les métabolites issus de la consommation de médicaments ou de produits cosmétiques (voir le §7.3.3.1.b sur l'écotoxicologie) – dans les environnements aquatiques, mais surtout de leurs effets potentiels ou réels sur les organismes des écosystèmes a notablement gagné en importance (Heberer 2002). L'homme est d'ailleurs la cible de ces micropolluants, qui, de manière générale, ne sont que partiellement dégradés par les systèmes de traitement habituels, comme les stations d'épuration (STEP) (Pickering & Sumpter 2003). Les impacts ne sont de loin pas connus de multiples études régionales sont menées en Europe afin de mieux les appréhender (Chèvre et al. 2003; Chèvre & Erkman 2011), par exemple celles réalisées dans la région lémanique en Suisse (Perazzolo et al. 2010; Morasch et al. 2010).

De plus, le traitement centralisé des eaux usées dans des stations d'épuration implique toujours une dilution des déchets organiques, puis une reconcentration, sous la forme de boues d'épuration. Ces processus sont très gourmands en énergie. Les potentiels d'économies d'eau et d'énergie, ainsi que la réduction des coûts opérationnels sont donc réels. Pour illustrer les limites de tels systèmes de traitement centralisé, on peut constater que les eaux usées ne contiennent qu'une très faible part d'urine (souvent largement inférieure à 1 % !). Concentrer ce flux d'eau jaune (d'un facteur 100 à 1000) devient intéressant, car il permet d'envisager la valorisation efficace à grande échelle de son contenu en éléments organiques.

Ainsi, le traitement décentralisé (près de la source des effluents) devient un enjeu majeur qui fait l'objet de recherches intensives. En Suisse, Novaquatis et sa technologie « NoMix »²³⁸ en est un exemple. Ce projet de l'EAWAG repose sur l'utilisation de toilettes séparant l'urine des matières fécales (Larsen & Lienert 2007). La valorisation de l'urine a été explorée sous ses nombreux aspects, allant de son acceptation sociale, aux technologies du sanitaire (génie des procédés, modalités d'entreposage et de transport, traitement des micropolluants), en passant par l'étude du potentiel de valorisation dans l'agriculture et par l'établissement de transferts de savoir et de technologie et de projets pilotes. L'approche utilisée semble pertinente et compatible avec celle visant à boucler les flux de matière dans le contexte des ECA, puisque Novaquatis a cherché à concentrer des éléments valorisables comme le carbone, phosphore ou l'azote contenu dans l'urine, en permettant ensuite leur valorisation matérielle

²³⁸Projet NoMix à l'EAWAG, achevé en 2009 :

www.eawag.ch/forschung/eng/schwerpunkte/abwasser/abwasserbehandlung_haushalt/ammoniakausgasung/index (dernière consultation le 20.10.2015)

(biocarburant, bioraffinage, production d'engrais, etc.). Dans cette perspective, l'urine n'est alors plus considérée comme un déchet organique, mais plutôt comme une source riche en matières premières « précieuses » pour des applications agroalimentaires ou industrielles.

Toujours selon l'EAWAG²³⁹, actuellement, 30 à 40 % de l'eau potable est utilisée pour les toilettes. Développer un système alternatif permettrait de réaliser une économie d'eau non négligeable. La question est donc plus que jamais d'actualité. Les canalisations de collecte des eaux de pays comme la Suisse sont parfois relativement anciennes. Il semble judicieux de développer progressivement un système sanitaire mieux adapté à nos besoins plutôt que de dépenser des milliards en frais de rénovation. Le projet NoMix achevé, les chercheurs de l'EAWAG cherchent dorénavant à « réinventer les toilettes » et travaillent sur un projet ambitieux de toilettes séparatives, permettant de récupérer l'urine et de la valoriser sur le site, de manière décentralisée. Concrètement, un système interne de séparation de l'urine à la source permet à ses toilettes de détourner l'urine qui ne sera pas mélangée aux matières fécales. Une installation pilote permet ensuite de récupérer les nutriments par nitrification puis distillation d'urine. Le contenu en ressort stabilisé et suffisamment concentré pour qu'il puisse être réutilisé de manière efficace, puisque près de 97% de l'azote est récupéré sous la forme d'engrais²⁴⁰. Cette initiative, qui est notamment financée par la Fondation Bill & Melinda Gates, souhaite favoriser le développement de toilettes bon marché à l'attention des pays en développement, dont les infrastructures et les systèmes d'information sur l'hygiène sont souvent déficients.

Le récent bâtiment de l'EAWAG intègre un système de collecte séparative des eaux usées, et peut être considéré comme une réalisation exemplaire et pionnière en termes de traitement décentralisé des effluents urbains (Larsen et al. 2013). Sans lui, les eaux jaunes des 300 collaborateurs de l'EAWAG auraient été mélangées à d'autres flux d'eaux usées du quartier et traitées de manière centralisée dans une STEP éloignée du bâtiment.

Conjointement avec l'EMPA (le laboratoire fédéral d'essai des matériaux), l'EAWAG a démarré en 2014 la construction d'un bâtiment du futur : NEST pour « Next Evolution in Sustainable Building Technologies »²⁴¹. Ce bâtiment expérimental testera l'habitat et les places de travail de demain. Les innovations des unités de recherche incluent le management des eaux urbaines et des eaux usées et en particulier la séparation à la source, la récupération des ressources organiques contenues dans les eaux usées, la production d'énergies à partir des eaux grises et noires, ainsi que la réutilisation des eaux de pluie et des eaux grises²⁴². NEST inclut également des recherches sur les éco-matériaux, la gestion

²³⁹ Consulter le rapport NoMix : www.wst21.ch/docs/Monitoring%20NoMix_gwa_wst21.pdf (dernière consultation le 20.10.2015)

²⁴⁰ EAWAG media release - Developing a toilet with a built-in water recovery system : www.eawag.ch/medien/bulletin/20110719/index_EN (dernière consultation le 22.10.2015)

²⁴¹ Site web du bâtiment modulaire NEST : <http://nest.empa.ch/en/> (dernière consultation le 22.10.2015)

²⁴² Voir la page web de l'unité Water management : <http://nest.empa.ch/en/innovation/water-management/> (dernière

énergétique des bâtiments et la domotique (§10).

En parallèle, en considérant les villes comme de véritables « mines urbaines » dont les effluents sont précieux – et assimilables dans une certaine mesure à de l'« or jaune » –, la valorisation de l'urine encourage l'utilisation de ressources matérielles secondaires par ces citoyens, avec en retour d'intéressantes économies en termes de coûts de production et/ou de traitement. Par exemple, la récupération des ions ammoniums contenus dans l'urine permet d'une part de réduire la production d'ammoniaque, évitant l'utilisation de technologies gourmandes en énergie fossile pour le traitement des eaux usées. D'autre part, une valorisation matérielle des éléments organiques permet par exemple de produire des engrais réutilisables dans un environnement urbain. En plus de leur utilité pour fertiliser les jardins, les parcs, et les toitures, ces nutriments récupérés peuvent être exploités dans les fermes verticales, comme on le verra au §10.3.

Cette valorisation matérielle de l'urine met en œuvre les concepts de symbiose industrielle et contribue à l'établissement d'un écosystème urbain plus durable qu'il ne l'est aujourd'hui dans la plupart des pays européens, de par un bouclage de flux de matières qui tire avantage de la proximité du lieu de production de l'urine.

Dans cette perspective, la création de boucles urbaines de valorisation du phosphore est une tentative de gestion durable des ressources. Tout comme l'azote, il est l'un des éléments clés pour la fertilisation des cultures. De plus, il s'agit d'une ressource qui subit une pression croissante. Premièrement, sa surconsommation a un impact en amont, étant donné que ses réserves minérales (roches phosphatées) sont en voie de raréfaction. D'ailleurs, des modélisations prévoient que le pic du phosphore pourrait être atteint d'ici 2030 déjà (Cordell et al. 2009). Deuxièmement, sa surexploitation a des effets en aval puisqu'il est l'un des principaux responsables des phénomènes d'eutrophisation des lacs. Sa valorisation vise donc également à minimaliser les pertes par dissipation. La récupération du phosphore de l'urine réduit la pression sur cet élément d'une part au niveau de ses ressources matérielles primaires et, d'autre part, de la pollution des eaux en diminuant la charge en phosphore des eaux usées entrant dans les stations d'épuration. Le développement de tels procédés de recyclage encourage des modes de consommation et de production plus efficaces du phosphore. La valorisation à grande échelle de l'urine permet également la production d'engrais « durables », comme de la struvite ($MgNH_4PO_4$), un fertilisant doté de propriétés d'action lente.

Une communication appropriée sur les enjeux et l'importance de la récupération, du recyclage et de la réutilisation des nutriments contenus dans les effluents urbains – et donc les déchets organiques riches en carbone, azote et phosphore –, inciterait au développement (et à l'utilisation !) de technologies permettant de réduire la consommation d'eau et d'énergie : toilettes « séparatives », urinoirs sans chasse

d'eau, toilettes réutilisant des eaux de lavage, etc.

Cependant, si nombre d'agriculteurs semblent disposés à acheter un fertilisant à base d'urine, un autre défi réside dans l'acceptation sociale par le producteur d'urine lui-même, peu habitué à une collecte séparée de l'urine et des matières fécales. Il s'agit d'éviter le syndrome « c'est une bonne idée, mais je n'en veux pas ! ». Dans cette perspective, une amélioration du rapport coût/bénéfice du traitement domestique des eaux usées permettrait d'accélérer la diffusion de telles technologies ces prochaines années.

Citons encore quelques-uns des défis pour le déploiement de ces écotecnologies à plus large échelle : dimensionnement adéquat des digesteurs pour des systèmes sanitaires « alimentés » au quotidien par plusieurs milliers de personnes, prévention de la diffusion de potentiels pathogènes contenus dans ces effluents, la non-obstruction des écoulements des toilettes aux chambres du biodigester, l'assouplissement des réglementations environnementales, qui empêchent parfois l'utilisation des déchets des organiques produits dans les bâtiments, même à des fins de recyclage. Les marchés cibles de telles technologies incluent le secteur de l'hôtellerie, de l'événementiel, les prisons²⁴³, les campus universitaires. De tels systèmes sont également pertinents dans le contexte des pays émergents dans lesquels la rationalisation de l'eau représente un enjeu particulièrement important, en vue de sa plus faible disponibilité en comparaison avec les pays européens. Ils font en quelque sorte partie des technologies « essentielles », c'est-à-dire des « technologies robustes, bon marché, adaptées au contexte des pays pauvres » (voir §5.2.1.6.f). Ces technologies, qui ne doivent pas être confondues avec de low tech, apportent de nouvelles façons de concevoir les produits, compatibles avec les contraintes des pays en développement, notamment en termes de coûts et d'accès aux ressources, et leurs applications seraient parfaitement appropriées aux habitats situés dans les climats chauds (les déserts notamment) (Polyakov et al. 2010).

7.4.2.2 Le projet MASSTER : vers une démonstration du potentiel de transfert de technologie des bioprocédés de recyclage de MELiSSA

Au sein d'un ECA, la boucle de l'eau représente une forte contrainte en termes de masse, qui va jusqu'à présenter parfois plus des trois quarts de la masse totale des consommables, voire plus si l'on considère également les eaux de lavages et d'hygiène (Grigoriev et al. 2010). Dans le cas d'un système comme MELiSSA (§4.2.1), les eaux usées proviennent essentiellement :

²⁴³ Voir l'utilisation de biolatrines pour valoriser énergétiquement les déchets organiques de prisons rwandaises : www.novethic.fr/novethic/planete/environnement/energie/les_latrines_prisons_rwandaises_alimentent_batiments_en_energie/96948.jsp (dernière consultation le 22.10.2015)

- de l'urine de l'équipage ;
- des eaux utilisées pour l'hygiène personnelle de l'équipage ;
- des eaux de lavages (vaisselle, vêtements) ;
- de processus de condensation dans le système de contrôle de l'humidité et de la température de la cabine ;
- de processus de réduction chimique de CO₂ produits par les systèmes de régénération de l'air ;
- de changements de phase issue de la stabilisation des déchets et de la dessiccation des matières fécales ;
- des expériences et des eaux de laboratoire (évapotranspiration des serres expérimentales et des processus de production de nourriture.

Parmi elles, on distingue les eaux « jaunes » (urines), « grises » (peu chargées en micropolluants, eaux d'hygiène, de vaisselles, de nettoyage, etc.) et « noires » (contenant des substances difficiles à éliminer, telles que des matières fécales, des polluants de type industriel, etc.). Chacune d'entre elles peut poser des problèmes pour les systèmes de régénération des ECA. En effet, la présence dans ces eaux aussi bien de composés organiques volatils de faible poids moléculaire (dont des micropolluants) que de microflores peut mener à une contamination des compartiments. D'ailleurs, la séparation des processus de traitement de l'urine et des matières fécales (discutée au chapitre précédent) permet de maximiser la part des eaux usées faiblement à modérément contaminées, qui peut ainsi être traitée par des processus moins complexes, consommant moins d'énergie tout en fournissant un taux de régénération efficient.

À titre d'exemple, l'ESA a mis au point un système de recyclage des eaux d'hygiène basé sur une combinaison de processus d'ultrafiltration et d'unités d'osmose inverse permettant l'élimination de macromolécules et des particules solides, de molécules organiques et inorganiques, des sels ioniques, ainsi que celles de micro-organismes. La performance des membranes utilisées dans ces processus doit permettre l'élimination des microbes, à savoir des bactéries, des spores, des virus (phages) et la prévention de biofilms (Tamponnet et al. 1999). Ainsi, l'eau des ECA peut-être recyclée assez aisément et en quasi-totalité par des procédés physico-chimiques relativement simples, mais qui nécessitent des quantités non négligeables d'énergie (par exemple pour la nanofiltration et l'osmose inverse des résidus liquides). Les études de l'ESA en la matière ont démontré l'excellent potentiel de technologies membranaires pour l'épuration et la purification des eaux, permettant la production d'eau potable à partir d'eaux usées faiblement polluées (en particulier pour les eaux de condensation et les eaux d'hygiènes) (Tamponnet et al. 1999).

Tout comme l'EAWAG, les groupes de recherche impliqués dans le développement de MELiSSA montrent un intérêt marqué pour la collecte séparée des matières fécales et de l'urine, afin de traiter les flux de cette dernière par l'intermédiaire de processus biologiques. Au travers du projet MASSTER, ils

souhaiteraient démontrer le potentiel de transfert de technologie d'une valorisation de l'urine basée sur les bioprocédés des ECA. Ceux-ci présentant un intérêt terrestre pour les procédés de traitement des eaux à petite et moyenne échelle, c'est-à-dire à l'échelle d'un usage domestique ou de quartiers urbains relativement réduits.

Le groupe « Écologie industrielle » de l'UNIL a rejoint un consortium composé d'universités européennes (Université Blaise Pascal, Universitat Autònoma de Barcelona, Université de Mons, Studiecentrum voor Kernenergie) et d'entreprises (SHERPA Engineering, EnginSoft et NeoBioSys, NTE-SENER et Technomembranes) qui a soumis à plusieurs reprises (de 2010 à 2013) une demande de financement dans le cadre des actions Marie Curie « Initial Training Network » du 7^e programme-cadre de la Commission européenne (Call: FP7-PEOPLE-2013-ITN). Malheureusement, à chaque fois les demandes de financement pour ce projet nommé MASSTER n'ont pas été sélectionnées. L'acceptation du proposal aurait permis de financer six thèses et six postdocs (dont une thèse et un postdoc à l'UNIL). Il semble toutefois pertinent de s'intéresser à son contenu et à sa portée dans ce chapitre, qui s'inscrit pleinement dans la perspective d'Oïkosmos (voir proposal en anglais à l'Annexe XX).

Concrètement, il s'agissait de combiner des sous-systèmes de MELiSSA dans le but de former une boucle simplifiée, en associant essentiellement les bioréacteurs des compartiments III et IV, respectivement composés de bactéries nitrifiantes (§4.2.1.2.d) et de micro-algues (§4.2.1.2.e). Ceux-ci eux-mêmes couplés à un module membranaire de filtration. Le dispositif peut être considéré comme un analogue d'écosystème terrestre basé sur des bioprocédés artificiels de recyclage permettant de produire de l'eau potable en « fixant » (valorisant) les éléments organiques contenus dans les eaux jaunes. Comme on l'a évoqué au §7.4.2.1, l'urine présente une forte teneur non seulement en carbone (urée, divers métabolites et produits de dégradation), mais aussi en azote (urée, ammonium) et en phosphore (phosphates). Rappelons que les (photo)bioréacteurs impliqués sont colonisés par des cultures pures (axéniques) et que le taux de confinement dépend du nombre de fois où les effluents sont amenés à recirculer dans le système.

L'acronyme MASSTER signifie en anglais : « Modelling, Analysis, Stability and Safety of a Terrestrial Ecosystem-based waste Recycling loop ». Le projet poursuit ainsi le triple objectif suivant :

- la *modélisation* des flux avec une approche scientifique rigoureuse basée sur les principes de la conservation de la masse et sur les bilans stœchiométriques (9.2.1)
- l'*analyse* de la *stabilité* et de la *sécurité* du système, et en particulier du risque d'accumulation de micropolluants, de polluants et de contaminants dans des *boucles de recyclage* fermées ou semi-fermées (§7.3.3.2.d).
- l'utilisation de procédés de recyclage analogues à ceux utilisés par les *écosystèmes terrestres*, ciblant la production d'eau potable et la récupération du carbone, de l'azote et du phosphore

(§7.4.2.1).

Le livrable que MASSTER reposait sur la conception, le dimensionnement, la fabrication et l'assemblage d'un prototype : le « Safe Water Filter » (SWF). Celui-ci devait permettre le développement d'unités de traitement des eaux usées compactes et mobiles, utilisables en tant que modules autonomes, aussi bien pour des applications industrielles de traitement des eaux à petite échelle à l'attention de compagnies privées, mais aussi pour des utilisations en situation de crise.

Maillon essentiel du programme de recherche associé, l'approche des sciences omiques (§8) devait permettre d'investiguer la stabilité génétique des bioréacteurs bactériens et d'étudier les aspects de protéomique et de métabolomique associés. L'objectif était d'évaluer le risque et les effets de l'accumulation de solutés et de micropolluants à l'intérieur du système sur les populations microbiennes des deux réacteurs, au sein d'une boucle de recyclage.

Le projet mettait en avant plusieurs aspects innovants. MASSTER cherchait avant tout à développer des technologies « avancées » de purification des eaux usées, alors que la plupart des technologies de traitement des eaux ne sont généralement pas « high tech » (même pour les effluents industriels). Les technologies en question offraient l'opportunité :

- d'utiliser les outils de la biologie moderne pour la caractérisation, l'intensification et l'amélioration de la sécurité, de la fiabilité et de la stabilité des bioprocédés de traitements des eaux usées ;
- de réduire (par « down-scaling ») des technologies de recyclage des eaux à des petites unités de traitement et de les appliquer à des systèmes clos et confinés ;
- d'évaluer l'impact global sur l'environnement des procédés de traitement des eaux usées, basé sur l'analyse approfondie des bilans de masse et d'énergie et la production de nouvelles métriques, permettant un benchmarking des solutions techniques testées.

Avec ces technologies, le projet MASSTER avait notamment pour ambition :

- d'élargir la portée des boucles strictement closes dédiées aux applications spatiales à des systèmes semi-clos répondant à des buts terrestres (domestiques) ;
- de déployer des synergies efficaces entre les sciences de l'ingénieur et celles du vivant ;
- d'ouvrir de nouveaux challenges aux sciences environnementales terrestres afin de développer de nouvelles technologies de recyclage des eaux usées.

Le principal enjeu scientifique de MASSTER visait à concevoir de nouveaux bioprocédés de purification de l'eau capables de fonctionner à des ordres de magnitude variés :

- au premier niveau, le système doit pouvoir traiter l'eau à des débits différents allant de quelques mètres cubes par heure à plusieurs milliers de mètres cubes par heure.
- au deuxième niveau, le système doit contrôler le retrait des principaux polluants, dont la concentration est de l'ordre du milligramme ou du gramme par litre.
- à un troisième niveau, le système doit assurer la suppression des micropolluants, dont les concentrations vont typiquement du nanogramme au microgramme par litre.

Le programme de recherche lié au projet MASSTER se chevauchait largement avec Oikosmos et comprenait les activités suivantes :

✧ À l'échelle du laboratoire :

- la conception, le dimensionnement et l'assemblage d'une boucle de recyclage à l'échelle du laboratoire ;
- la caractérisation métabolique et la modélisation mathématique des bioprocédés bactériens, afin d'étudier le comportement des micro-organismes dans l'environnement ultracontrôlé ;
- l'étude de la stabilité enzymatique d'un processus de recyclage en continu soumis à des conditions de stress :
 - le contrôle de l'évolution des communautés microbiennes via les technologies de la biologie systémique : génomique, transcriptomique, protéomique, métabolomique, etc. (§8.2) ;
 - l'étude de l'adaptation génétique et des processus d'évolution des populations de bactéries (§8.2) ;
 - l'étude de l'accumulation de métabolites toxiques (§7.3.3.2.d).
- le monitoring de l'évolution génétique des bactéries en cas de contamination externe (micro-organisme étranger ou élément génétique mobile provenant du bioréacteur en aval) ou en cas de mutations ou de réarrangements génétiques internes :
 - suivi des dérives génétiques, évaluation du risque microbiologique, transfert horizontal de gène, éléments génétiques mobiles, émergence de souches résistantes (résistance aux médicaments ou aux antibiotiques), émergence de souches virulentes, apparitions de toxines (§8.2) ;
 - contrôle de l'axénicité avec les outils omiques (§8.2) ;
- l'investigation du devenir et des effets de micropolluants introduits par l'urine dans la boucle :
 - analyse de la métabolisation et du comportement des micropolluants, de leurs effets sur la cinétique et la stabilité de différents organismes (§7.3.3.2.d) ;
 - développement, test et optimisation de contre-mesures pour l'accumulation des micropolluants (§7.3.4.5).

✧ À l'échelle pilote :

- le développement d'une ingénierie du système de support-vie à plus large échelle (voir §4.2.1.4 sur le MELiSSA Pilot Plant) :
 - agrandissement (scaling-up) de différentes cultures à différentes conditions environnementales (lumière, mix, stress, etc.) ;
 - caractérisation via des senseurs de biomasse expérimentaux ;
 - modélisation complète de la boucle pour simuler les différentes configurations ;
 - ingénierie des systèmes : définition d'un référentiel catalogant les prérequis, la traçabilité, les tests de validation, la processus de validation de la boucle) ;
 - analyse des données et optimisation à l'échelle pilote.
- l'évaluation des bioprocédés avec l'approche de l'écologie industrielle :
 - analyse de flux de matières (§7.2.3) et analyse de cycle de vie (§7.2.5) ;
 - étude de la durabilité systémique (§7.2.6) ;
 - étude de cas : gestion des eaux urbaines et systèmes sanitaires dotés d'une haute performance environnementale (§7.4.2.1) ;
 - symbiose industrielle : gestion intégrée des ressources/valorisation du CO₂ (§7.4.3).

Enfin, les retombées scientifiques attendues de MASSTER comprenaient :

- la conception et l'assemblage d'un prototype (le SWF) permettant l'étude approfondie des effets de l'accumulation de polluants dans l'environnement, mais aussi dans le système de traitement *lui-même* (voir le §7.3.3.2.c sur les outils d'analyse de la distribution d'éléments et de molécules) ;
- la collecte de nouvelles données sur la dynamique des communautés microbiennes et sur l'évolution des cellules microbiennes dans les habitats terrestres confinés, en tant qu'analogie des conditions d'ECA d'habitats spatiaux, en échantillonnant, analysant et en construisant une base de données commune (voir le §9.2.2 sur l'harmonisation des données omiques) ;
- l'identification et la description du rôle des paramètres environnementaux (comme le confinement, les hauts taux de recyclage, la température, l'humidité, les substrats pour la croissance) pour l'induction ou la sélection de changements dans les cellules et les communautés microbiennes, aussi bien dans l'air, dans l'eau et dans les déchets organiques que dans la microflore humaine (voir le §8.3.3) ;
- l'identification et la description des procédés impliqués dans les changements d'abondance microbienne, de diversité, d'interactions (transfert de gènes) et d'équilibre : évolution génétique après de multiples générations (taux de mutations par des erreurs de réplication naturelles, ou

par des éléments génétiques mobiles, induction et sélection des processus), évolution du nombre de copies de chromosome et de l'expression des gènes (par exemple ceux responsables de l'activation de pathogénicité, évolution du taux de prolifération cellulaire, de la capacité de fixation et de la colonisation de surfaces, etc. (voir le 10.5 sur le contrôle qualité des surfaces au sein d'un habitat sain) ;

- l'identification des micro-organismes clés et des indicateurs et marqueurs précoces représentatifs qui peuvent être utilisés dans les systèmes de monitoring du traitement de l'eau (voir le §7.3.3.2.b sur les outils de détection précoce) ;
- le développement de modèles mathématiques de comptabilité physique permettant une compréhension globale de l'évolution des communautés microbiennes (voir le §9.2.1 sur la modélisation mathématique de systèmes complexes) ;
- l'application d'une approche systémique multi-critères pour l'étude des impacts environnementaux du recyclage de l'eau (voir le §5.1.3.1 sur l'approche systémique).

En parallèle ou en complément au projet MASSTER, le programme Oikosmos inclut d'autres thématiques et sujets de recherche liées à la décontamination des eaux usées, et des déchets organiques en général, à savoir :

✧ L'optimisation des processus de gestion des déchets (déchets humains solides et liquides, déchets inertes potentiellement dangereux, déchets métaboliques et inorganiques) à toutes les étapes de récolte, de collecte (collecteur), de stabilisation, de traitement, de manutention, de transport, de séchage et de stockage des déchets.

✧ La valorisation des déchets organiques humains (év. animaux) et végétaux (voir le 7.4.4 sur le bioraffinage) :

- récupération de la matière organique issue des excréments humaines par voie physico-chimique (coagulation, floculation), par voie chimique (oxydation), ou par voie biologique (micro-organismes des bioréacteurs, sol artificiel d'une serre).
- valorisation de la biomasse végétale non comestible : par compostage, etc. ;
- valorisation de l'urine pour les cultures de plantes : valorisation matérielle (production d'engrais), énergétique (production de biocarburants), thermique (incinération avec ou sans transformation et mélange pour valorisation thermique) ou pyrolyse (chambre chauffée en absence d'air ou d'oxygène).

✧ L'optimisation des processus opérationnels et des procédés de traitement biologique et/ou physico-chimique des eaux usées favorisant leur traitement décentralisé (Bornemann et al. 2015) :

- développement de nouvelles méthodes et stratégies de mesure, d'épuration, de purification, de dépollution, de régénération, de stockage, de distribution, etc. ;

- développement de technologies membranaires d'épuration et de purification des eaux usées faiblement polluées (eaux de condensation, eaux d'hygiène) par filtration sur membrane (ultrafiltration, nanofiltration, osmose inverse).
 - développement de techniques et de procédés de récupération et de valorisation (De Paepe et al. 2018) :
 - optimisant les technologies de nitrification et la précipitation du phosphore et de l'azote en présence de magnésium, afin de former des composés comme la struvite ;
 - des substances (y compris les nocives) retenues dans les filtres des équipements de traitements et d'épuration des eaux ;
 - améliorant l'élimination de micropolluants organiques, de polluants inorganiques et de composés chimiques en traces.
 - développement de techniques et de procédés améliorant l'efficacité du traitement des eaux usées et réduisant la consommation d'eau et d'énergie (Larsen et al. 2013), basées sur :
 - des technologies de collecte séparée de l'urine et des matières fécales (toilettes « séparatives ») ;
 - des urinoirs sans chasse d'eau ;
 - des techniques de réutilisation de l'eau de lavage ;
 - des technologies permettant de minimiser les risques d'obstruction des conduites d'évacuation.
 - développement de technologie de traitement des effluents agro-industriels à haute teneur en azote, phosphore, cadmium, mercure, métaux lourds, etc. ;
 - développement de procédés de désinfection et de stérilisation des effluents agro-industriels (élimination de micropolluants, de spores, de micro-organismes, de champignons, de micro-algues, de protistes, de virus, de prions, etc.) :
 - par des procédés physico-chimiques tels que l'oxydation et l'ozonation ;
 - par désinfection solaire par rayonnement UV (inactivation des virus).
- ◇ L'optimisation du monitoring de la qualité de l'eau (voir le §7.3.3.2 sur l'hypermonitoring des conditions environnementales) :
- établissement d'un suivi combiné de la qualité biologique et chimique de l'eau ;
 - développement de système de contrôle de l'humidité (température, processus de condensation).

7.4.3 Un dispositif expérimental pour la valorisation chimique et biochimique du dioxyde de carbone

7.4.3.1 Le dioxyde de carbone : une ressource à valoriser et non plus un déchet à capter puis à stocker

La concentration de CO₂ dans l'atmosphère terrestre a forté augmenté depuis le milieu du 19^e siècle dépassant les 400 ppm au printemps 2013²⁴⁴. La contribution de ce gaz effet de serre au changement climatique est plus que jamais d'actualité et avec ses impacts environnementaux mesurables telles que l'augmentation de la température globale moyenne et la diminution du pH des océans (Intergovernmental Panel on Climate Change 2008; Stocker et al. 2013). Partant du constat que les mesures visant à réduire les émissions de CO₂ ne sont pas suffisantes, voire inefficaces pour certaines d'entre elles, le « Carbon Capture and Storage » (CCS) est devenue une approche en vogue ces dernières années. Cette stratégie consiste à capter les effluents de concentrés de ce gaz directement sur leur lieu d'émission (centrales thermiques ou industries) puis à le stocker dans des formations géologiques adéquates. Bien que son coût soit relativement plus élevé, le captage du CO₂ directement depuis l'atmosphère terrestre (« direct air capture », DAC) est préconisé et certains groupes de recherche expérimentent l'extraction atmosphérique directe de ce gaz (Keith et al. 2006; Keith 2009; Lackner 2009), et des start-ups à fort potentiel comme ClimeWorks²⁴⁵ se développent dans le but d'apporter une solution aux émissions de CO₂ diffuses (secteur du transport principalement) et réduire la quantité absolue de CO₂ déjà accumulée. Bien que la concentration du CO₂ soit nettement moindre (environ 300 fois inférieure) dans l'atmosphère que dans les effluents gazeux industriels, les techniques permettant de le séparer sont assez similaires.

Cependant, la séquestration géologique du dioxyde de carbone est de plus en plus critiquée comme étant une solution coûteuse, n'apportant aucun bénéfice et présentant des risques de relâchement à long terme. Par conséquent, le concept de CCV (« carbon capture and valorization ») a fait son apparition en parallèle (voir par exemple Aresta & Dibenedetto 2007; Mikkelsen et al. 2010). Dans cette approche, le CO₂ est destiné à être transformé en produits finis, quelle que soit la manière dont il a été initialement capté et éventuellement purifié. De cette manière, le dioxyde de carbone peut être envisagé comme une ressource plutôt que comme un déchet, le concept s'inscrit ainsi parfaitement dans les stratégies opérationnelles chères à l'écologie industrielle.

7.4.3.2 Le dioxyde de carbone : une source de carbone exploitable dans le contexte des ECA

Le coût technologique élevé reste souvent un des principaux freins empêchant la mise en application à

²⁴⁴ Voir l'article du National Geographic au sujet de ce jalon : Climate Milestone: Earth's CO₂ Level Passes 400 ppm », publié le 09.05.2013 : <http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2013/05/130510-earth-co2-milestone-400-ppm/>

²⁴⁵ Site web de la start-up suisse en plein essor depuis sa fondation en 2009 : <https://www.climeworks.com>

large échelle des procédés CCV. En comparaison avec la voie de valorisation directe du CO₂ par captage, sa valorisation indirecte CO₂, par transformation de biomasse, est plus rentable, alors que l'extraction et la transformation chimique de réserves fossiles, si l'on en dispose en suffisance, est presque toujours moins énergivore, et donc meilleur marché. Cependant, la diminution des réserves fossiles et des terres arables semble rendre inéluctable qu'un jour ou l'autre le dioxyde de carbone devienne une des sources principales de carbone. Dès lors, un projet de valorisation du gaz carbonique dans le cadre d'un simulateur d'ECA ou d'une base martienne ne peut qu'apporter des éléments nouveaux à ce concept.

La gestion adéquate du dioxyde de carbone est essentielle au bon fonctionnement des ECA : le contrôle sa concentration dans l'air ambiant est indispensable maintien de la vie des habitants de l'écosystème. Ceci est vrai non seulement pour les êtres humains, qui ne peuvent tolérer une concentration trop élevée en dioxyde de carbone (risque d'asphyxie par remplacement du dioxygène), mais également pour les végétaux qui serviront à nourrir l'équipage et qui eux ont besoin d'une concentration suffisante pour leur croissance.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en avant les bénéfices que pourra apporter l'étude des ECA à la problématique terrestre du dioxyde de carbone. Dans cette perspective, une brève exploration des voies chimiques et biologiques de valorisation du CO₂ les mieux adaptées aux ECA est proposée ci-dessous. L'étude est séparée en deux parties distinctes, selon deux degrés de fermeture de l'ECA : strictement clos ou semi-ouvert, soit respectivement sans et avec apport externe de CO₂.

Concrètement, l'étude se concentrera d'abord sur des scénarios de « simulation au sol » ou « voyage spatial » d'une mission spatiale de longue durée sans aucun apport externe de carbone (§7.4.3.3), une fois les opérations de l'écosystème démarrées. Sans source externe de CO₂ disponible, les écosystèmes artificiels du démonstrateur et de la navette seront considérés comme « strictement clos ».

Ensuite, l'analyse portera sur le fonctionnement d'un simulateur d'ECA ou d'une base spatiale à la surface de la planète Mars, bénéficiant d'un apport externe de dioxyde de carbone (§7.4.3.4). L'atmosphère martienne est composée à 95% de CO₂, faisant de ce gaz une source de carbone externe facilement mobilisable et exploitable sur cette planète, en vue de synthétiser une kyrielle de composés organiques ou inorganiques. Cette utilisation laisse entrevoir des possibilités d'amélioration de l'ECA, mais aussi d'extension d'une future station martienne. Ceci est aussi vrai pour d'autres molécules que l'on extrairait du sol martien, et qui pourraient servir de co-réactifs. Cette approche d'utilisation des ressources in-situ (ou ISRU pour « in-situ resource utilisation ») évite d'avoir à amener depuis la Terre l'ensemble des ressources matérielles et énergétiques.

En particulier, les ECA pourraient participer au développement d'un concept relativement nouveau qui émerge peu à peu, le « bioraffinage », qui consiste à substituer la biomasse aux ressources fossiles, afin de produire des molécules utiles (§7.4.4). Le carbone constituant cette biomasse étant extrait initialement de l'atmosphère par photosynthèse, cette stratégie s'apparente dans les faits à une

valorisation indirecte du CO₂ atmosphérique.

Les enseignements apportés par l'étude des ECA pourraient ainsi servir à sélectionner et optimiser les procédés qui permettront, sur Terre, d'utiliser au mieux cette molécule afin de produire toute une gamme de molécules actuellement dérivées des ressources fossiles, en particulier des molécules à haute valeur ajoutée.

À ce stade, il convient de signaler plusieurs particularités de la valorisation du CO₂ en ECA, concernant :

✧ *Les stocks de CO₂ et de co-réactifs disponibles*

Bien que le concept d'ISRU permette d'envisager théoriquement l'utilisation de toutes les ressources disponibles sur Mars, il serait cependant opportun de réfléchir dès le départ au potentiel de durabilité des procédés mis en application sur place. Par exemple, même si cela peut paraître contre-intuitif d'un point de vue terrestre où la surabondance du CO₂ devient problématique, et bien que la quantité totale de carbone disponible sous forme de CO₂ dans l'atmosphère martienne soit quasiment illimitée (de l'ordre de 24 téatonnes²⁴⁶), il serait donc nécessaire de penser dès le début à recycler au mieux les matériaux organiques ou les carburants produits à partir de cette ressource. En effet, malgré sa teneur élevée en CO₂, la pression partielle atmosphérique moyenne est près de 150 fois plus faible que sur Terre²⁴⁷, ce qui pourrait nécessiter de le comprimer pour certains usages « industriels » ou pour une exploitation à grande échelle au sein d'ECA. Le constat est le même pour l'empreinte hydrique des procédés, puisque la molécule d'eau est très souvent le pourvoyeur de l'hydrogène nécessaire à la production d'hydrocarbures (§7.4.3.4.b). Les outils développés par l'écologie industrielle, et particulièrement les analyses de flux de matières, s'avèreront précieux pour exploiter au mieux les procédés (voir par exemple le §7.2.3).

✧ *La microgravité*

Sur la surface de Mars, la gravité est seulement d'un tiers de celle rencontrée sur terre. Ce paramètre fondamental aura sans doute une importance considérable pour toutes les voies de valorisation du CO₂ envisagées. Au niveau biologique, il faudra s'assurer que les végétaux cultivés puissent s'adapter à cette différence de gravité. Quant à la voie chimique de valorisation, il faudra là aussi prendre en compte ce paramètre dont on sait qu'il influence le déroulement des réactions chimiques. La chimie en microgravité n'ayant été jusqu'ici que peu étudiée pour des questions pratiques évidentes, il n'est pas aisé de prévoir quelles réactions fonctionneront le mieux dans ces conditions particulières. Par exemple, lorsqu'une catalyse hétérogène est utilisée, il est probable que les processus se déroulant à leur surface soient différents de ceux que nous observons sur terre. Cependant la recherche dans ce domaine est en

²⁴⁶ Voir la page de Wikipédia dédiée à l'atmosphère martienne (dernière consultation : 18.09.2013) : http://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Mars

²⁴⁷ Ibid.

plein essor, et il est probable que des moyens considérables soient engagés ces décennies afin de mieux comprendre l'influence de ce paramètre aussi bien sur les processus biologiques que physico-chimiques. Dès lors, il serait souhaitable que des recherches soient aussi menées dans le domaine de la valorisation du dioxyde de carbone en microgravité.

✧ *Les équipements et appareillages*

Dans le cadre d'une mission spatiale de longue durée sur Mars, la masse et le volume des équipements et des appareils d'analyse, de production et de purification des produits devront être réduits au maximum. S'il paraît possible d'utiliser les ressources présentes à la surface de la planète, il est inévitable d'amener l'appareillage initial depuis la Terre, plutôt que de le fabriquer à partir de matériaux extraits sur place. Cet aspect va vraisemblablement influencer la sélection des procédés mis en œuvre pour la valorisation du CO₂. À titre d'exemple, il est probable que les réactions sous forte pression seront à éviter, car les réacteurs permettant de supporter cette pression seront inévitablement plus lourds que leurs homologues fonctionnant à pression ambiante. De même, il serait avantageux de pouvoir utiliser le même appareillage pour différentes synthèses.

Tout en gardant à l'esprit ces contraintes, des applications terrestres pourront être élaborées grâce au simulateur d'ECA notamment pour les aspects suivants :

- *purification du CO₂* : étant donné la concentration très élevée du CO₂ dans l'atmosphère martienne, son extraction s'apparenterait plus à une purification qu'à une « capture classique » dans les effluents gazeux de procédés industriels. Les enseignements apportés par la valorisation martienne du CO₂ seront utiles pour étudier l'influence de contaminants tels que l'oxygène, l'azote ou l'argon.
- *capture du CO₂ à faible concentration* : la régénération d'air durant le vol spatial impose de capter le CO₂ à une concentration très faible, de l'ordre de celle que l'on retrouve dans l'atmosphère terrestre. Dès lors, il est évident que les connaissances acquises dans le cadre des ECA pourront ensuite servir à la capture atmosphérique directe sur Terre ;
- *optimisation des procédés* : il est probable que les expériences réalisées en microgravité permettront de mieux comprendre certains mécanismes réactionnels et d'optimiser les procédés de valorisation du CO₂ dans un contexte terrestre ;
- *intégration des procédés* : les contraintes inhérentes à la valorisation du CO₂ en mission spatiale obligeront dès le départ à prévoir une stratégie durable, sans gaspillage de ressources ou production importante de déchets. Cette nécessité de boucler les flux de matière en ECA sera considérée comme un modèle à suivre sur Terre, et les retours d'expérience de la valorisation du CO₂ en système clos serviront à sélectionner les procédés qui présenteront le meilleur potentiel terrestre.

7.4.3.3 *L'écosystème artificiel strictement clos*

Actuellement, divers systèmes de régénération d'air existent et sont couramment utilisés dans des sous-marins ou dans la station spatiale internationale. La technique qui semble la plus appropriée consiste à effectuer une adsorption du CO₂ par un solide, tel que des oxydes de métaux ou des groupements aminés greffés sur phase solide²⁴⁸. En effet, l'utilisation d'un adsorbant solide permet de s'affranchir des problèmes que poserait probablement l'évaporation de la solution en cas d'absorption, par un liquide comme la méthanolamine (MEA) par exemple. Les amines étant généralement toxiques, ce problème potentiel est d'ailleurs fréquemment évoqué dans le cadre de la capture de CO₂ en postcombustion aux cheminées des centrales électriques (Rivas et al. 2000; MacDowell et al. 2010). Il est évident que cette évaporation serait bien plus problématique à l'échelle d'une navette spatiale. Après l'adsorption, le solide peut être régénéré soit par chauffage (procédé TSA, « temperature swing adsorption »), soit par diminution de pression (procédé PSA, « pressure swing adsorption »). À ce sujet, il pourrait être intéressant d'utiliser le vide spatial, évitant ainsi la dépense énergétique requise pour diminuer la pression. Il est aussi possible de combiner les deux techniques. Quant à la molécule d'oxygène, elle peut être régénérée par électrolyse de l'eau, si l'on dispose de l'énergie nécessaire.

Le procédé décrit ci-dessus n'est évidemment pas adéquat dans un environnement artificiellement clos, car il ne régénère pas la nourriture organique produite par la croissance de végétaux. Il pourrait cependant convenir comme « solution de secours » en cas de dysfonctionnement passager dans la culture des végétaux, voire même de solution ultime permettant le retour sur terre des membres d'équipage en cas de problèmes irréversibles ne permettant plus aux végétaux d'accomplir leur rôle de régénérateur d'atmosphère. Il s'agirait d'une alternative intéressante à l'utilisation de zéolithes pour la capture du CO₂, qui a fait l'objet de recherche par le passé (Mattox et al. 2013). Rappelons que la redondance est justement une des caractéristiques des écosystèmes naturels, leur permettant de pallier au dysfonctionnement éventuel d'un des composants du système (voir à ce sujet les systèmes de backup discutés au §7.3.4.3.c sur l'architecture massivement parallèle).

Durant le voyage spatial, il est possible de considérer que l'atome de carbone de la molécule de CO₂ est issu des aliments consommés par les membres d'équipage, tandis que les deux atomes d'oxygène proviennent principalement d'une molécule d'oxygène consommée par le processus de la respiration. Par conséquent, il est difficile d'imaginer un autre mécanisme que la photosynthèse capable d'inverser le processus, c'est-à-dire de recréer des aliments et de l'oxygène à partir de CO₂ que ce soit à partir de plantes supérieures ou de micro-algues comme la spiruline (Fulget et al. 1999). De plus, la photosynthèse permet aussi de recycler la molécule d'eau exhalée par les membres d'équipage. Pour ces

²⁴⁸ Un adsorbant solide composé de groupes aminés greffés sur phase solide est actuellement le procédé envisagé par la NASA pour équiper la nouvelle génération de navettes spatiales en développement. Ce procédé a l'avantage de pouvoir aussi capter la vapeur d'eau.

raisons, il s'agit d'ailleurs de la principale solution envisagée pour la régénération de l'oxygène dotées d'ALSS. Cependant, des contraintes sécuritaires imposent de disposer de moyens supplémentaires pour régénérer de l'air, en cas de problèmes lors de la culture de ces organismes autotrophes.

Par analogie, il serait donc judicieux de bénéficier d'un système de mesure en et de régulation en temps réel du taux de CO₂ dans l'habitable pour remédier à toute augmentation inopinée de la concentration de ce gaz. Relevons que les variations de concentrations de CO₂ ont été constatées durant les campagnes de *Biosphere 2* (§4.1.4), avec toutefois une certaine latence en comparaison des capacités avancées de monitoring des conditions environnementales d'un ECA tel qu'envisagé dans le cadre d'Oïkosmos (voir le §7.3.3.2).

7.4.3.4 L'écosystème clos artificiel, mais avec apport externe de CO₂

En envisageant la mise en place d'une base permanente sur le sol martien, l'utilisation du CO₂ composant la majorité de l'atmosphère (> 95%) de cette planète, ouvre de très vastes horizons grâce au concept d'« in situ resource utilisation » (ISRU) introduit plus haut. En effet, en faisant l'hypothèse que cette base dispose de suffisamment d'énergie, les molécules que l'on pourrait théoriquement synthétiser sont très variées. La transformation du CO₂ pourrait alors suivre une voie biologique (concept de la bioraffinerie) ou chimique.

7.4.3.4.a La voie biologique

Il est tout à fait possible d'imaginer la construction de serre attenante à la base spatiale, où l'on cultiverait des végétaux susceptibles de fournir non seulement la nourriture et l'oxygène nécessaires aux habitants, mais surtout une grande variété d'autres molécules biosourcées, par exemple des biocarburants (méthane, éthanol, etc.), des biopolymères (acide polylactique, polyhydroxyalkanoates, etc.) et même des intermédiaires chimiques (acide succinique, lysine, etc.) (Sonnenberg et al. 2007) (voir également §7.4.4).

Parmi les intrants principaux, le CO₂ et l'eau se trouvent sur la planète Mars. Toutefois, la disponibilité en abondance du dioxyde de carbone est à relativiser au vu de la pression atmosphérique moyenne sur Mars qui est de 600 Pa, soit plus 150 fois inférieure à celles de la Terre, qui combinée ensemble implique qu'il y a environ 15 fois plus de molécules de ce gaz pour un volume donné que dans l'atmosphère terrestre. L'eau est quant à elle également présente, mais majoritairement bloquée sous forme de glace. L'accès à l'eau posera des difficultés au niveau opérationnel et imposera un choix précis de site d'amarsissage.

D'un autre côté ces molécules sont également produites par le processus de la respiration des organismes

de l'ECA, leur cycle pourrait être en théorie totalement bouclé en théorie. Le principal argument en défaveur de cette voie concerne la place occupée par les cultures de végétaux. En effet, même en optimisant les procédés de culture (p.ex. culture hydroponique, ferme verticale, voir les §8.3.1.2 et §10.3), les infrastructures nécessaires à la croissance de végétaux semblent difficilement en mesure de régénérer l'atmosphère lors des phases initiales de déploiement des premières stations spatiales martiennes.

Toutefois, sur l'ensemble de la mission, la voie royale pour le CO₂ reste la photosynthèse biologique, par des micro-organismes comme la spiruline ou des végétaux (plantes supérieures), qui combine eau et gaz carbonique pour former des micromolécules glucidiques (glucose, permettant la synthèse ultérieure de macromolécules comme l'amidon, la cellulose, etc.), transformables en acides gras (synthèse des lipides) et avec un apport d'azote en acides aminés (synthèse des protéines) et bases azotées (synthèse des acides nucléiques).

En complément, lorsque les concentrations de CO₂ sont trop élevées pour être mitigées par la voie photosynthétique, ou alors lorsqu'un apport externe de dioxyde de carbone est disponible, une extension de l'ECA est envisageable. Il peut aussi s'agir de valorisations basées sur d'autres voies métaboliques faisant intervenir certaines des réactions enzymatiques propres au processus de photosynthèse (cycle de Calvin). La photogénération, c'est-à-dire l'électrolyse de l'eau en utilisant l'énergie solaire, est une option intéressante permettant produire de l'hydrogène et de l'oxygène purs. Ceux-ci peuvent ensuite être combinés dans une pile à combustible pour reproduire de l'eau et de l'énergie. L'énergie solaire est ainsi convertie en énergie utile (Volk 1996; Tito et al. 2013; Rosenthal & Nocera 2007).

D'autres, des bactéries naturellement adaptées à des environnements extrêmes par certains de leurs paramètres vitaux, grâce à des approches phylogénétiques (modélisation de la complexité du vivant), pourraient permettre d'optimiser les processus photobiologiques, de stabiliser des biosystèmes complexes ou d'effectuer des biosynthèses de biopolymères (voir §7.4.4).

Enfin, l'optimisation des conditions de cultures aussi bien dans les photobioréacteurs que dans les serres est également un enjeu important, par exemple pour sélectionner un éclairage à des longueurs d'onde maximisant la croissance des plantes, et donc la capture de CO₂, qui impacte également sur la performance énergétique de l'ECA.

7.4.3.4.b La voie chimique

Contrairement à la voie biologique, la valorisation du CO₂ par transformation chimique (Peters et al. 2011) semble plus aisée à mettre en place dans une base spatiale martienne. En effet, elle nécessite moins d'infrastructures et occupe moins de place que la voie biologique. De manière générale, la marche à suivre consisterait à emmener l'appareillage nécessaire aux réactions chimiques (réacteurs, unité de

capture de CO₂, système de purification et d'analyse des produits), ainsi que les catalyseurs éventuellement requis. Cependant, de par les contraintes imposées par les voyages spatiaux, il sera préférable de réduire au maximum le poids et le volume de l'équipement qui devra être apporté initialement depuis la terre. Par la suite, il serait opportun de parvenir à fabriquer tout ou partie de ceux-ci directement sur place.

De nombreuses substances chimiques pourraient être prélevés directement sur Mars par ISRU. Le dioxyde de carbone évidemment, mais également de l'eau et différents types de matériaux, comme des oxydes métalliques que l'on pourrait extraire du sous-sol de la planète.

Un autre point d'importance cruciale concerne l'énergie nécessaire à la plupart des réactions de valorisation du CO₂. Il est évident que celle-ci devra être disponible en suffisance grâce à des unités de transformations amenées (en tout cas dans un premier temps) depuis la Terre. Dans le contexte de cette étude, nous ferons l'hypothèse que l'énergie est disponible en quantité suffisante pour la valorisation du CO₂.

Enfin, il faudra réussir à intégrer au mieux les différents procédés de valorisation pour éviter que l'accumulation d'un sous-produit devienne problématique et de garantir un fonctionnement durable de l'ECA.

Les possibilités de valorisation chimique du CO₂ sont nombreuses et variées. Les différentes voies de valorisation qui suivent ont été sélectionnées selon les catégories de produits qui peuvent être synthétisés et qui offrent un certain potentiel sur la planète Mars. Il s'agit de carburants comme le méthane et le méthanol, et de matériaux à bases de polymères de type polycarbonates ou polyuréthanes-amines et carbonates minéraux.

✧ Le méthane

Comme décrit par la plupart des scénarios de la NASA (Drake et al. 2010), la principale utilisation du CO₂ de l'atmosphère martienne pourrait bien être la synthèse de carburant, et plus particulièrement de méthane par la réaction de Sabatier (Sridhar et al. 2000). Celle-ci produit de l'eau et du méthane à partir de dioxyde de carbone et d'hydrogène (voir Figure 12).



Figure 12: Réaction de Sabatier.

Actuellement, les agences spatiales prévoient d'emporter l'hydrogène nécessaire à la réaction depuis la

terre. Outre la formation de méthane, cette réaction produit aussi de l'eau, qui peut être récupérée afin de fournir de l'hydrogène et de l'oxygène par électrolyse. Dans l'optique de cette stratégie, l'oxygène servirait à la fois pour assurer l'approvisionnement des habitants de la station et comme comburant dans la réaction de combustion du méthane. Autre atout : la faible masse moléculaire de l'hydrogène à embarquer, au regard du méthane produit par ladite réaction, étant donné que le gaz carbonique est abondant sur Mars.

Cependant le concept ISRU peut théoriquement être développé encore plus en avant en imaginant que l'eau présente sous forme de glace aux pôles martiens²⁴⁹ puisse être utilisée afin de produire par électrolyse tout l'hydrogène et l'oxygène nécessaires.

Soulignons enfin que ce processus de méthanisation est envisagé pour la revitalisation de l'air intérieur de l'habitat martien, avec pour enjeu cette fois une concentration de gaz carbonique en présence fortement diluée par rapport à l'atmosphère extérieure (Hwang et al. 2008).

✧ Le méthanol

Par hydrogénation catalytique de CO₂, du méthanol peut aussi être produit, comme le montre la réaction à la Figure 13.



Figure 13: Réaction de synthèse de méthanol par hydrogénation de CO₂.

Outre son utilisation comme combustible, la production de méthanol pourrait également ouvrir d'autres pistes intéressantes, par exemple son utilisation en laboratoire comme solvant. Mais c'est surtout en tant qu'intermédiaire chimique qu'il pourrait jouer un plus grand rôle dans le contexte d'une mission spatiale de longue durée. En effet, le méthanol peut facilement être transformé en diméthyléther ou en formaldéhyde. Ce dernier entrant dans la composition de certains plastiques et résines, il est clair que son potentiel d'utilisation est grand dans le contexte d'Oikosmos.

✧ Les polymères de type polycarbonates

La synthèse de polymères à partir de dioxyde de carbone ouvre une voie extrêmement intéressante dans

²⁴⁹ Voir à ce sujet, le site de l'ESA, « Mars Express radar gauges water quantity around Mars' south pole » (consulté le 10.10.2013) :

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Mars_Express_radar_gauges_water_quantity_around_Mars_south_pole

la vision d'une base spatiale martienne habitée durant une longue période. Actuellement, les deux types de polymères synthétisables à partir de CO₂ sont les polycarbonates (Darensbourg 2007; Darensbourg 2010) et, en conditions supercritiques, les polyuréthanes-amines (Ihata et al. 2005). La réaction permettant la synthèse des polycarbonates est décrite à la Figure 14.

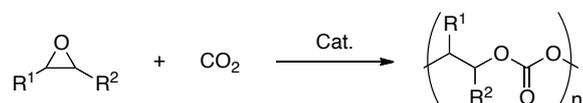


Figure 14: Formation de polycarbonates.

Les polycarbonates forment un plastique aux propriétés de rigidité et de transparence très intéressantes, notamment pour la confection de serres. Cet exemple n'est pas pris au hasard. On voit là tout le potentiel que pourrait jouer la valorisation de CO₂ dans l'optique de la construction et l'expansion d'une base martienne.

Si le CO₂ est facilement accessible *in situ*, il n'en va pas de même du co-réactif de la famille des époxydes. Deux options sont alors envisageables, l'emmener avec soi ou le produire sur place. Cette dernière solution est la plus élégante, mais comporte aussi de nombreux défis technologiques à résoudre.

Sur terre les époxydes sont généralement produits par oxydation partielle d'alcènes, ces derniers étant obtenus par vapocraquage d'alcane. En théorie, il serait possible de suivre une route plus ou moins similaire sur Mars, en partant de dioxyde de carbone. En effet, ce gaz pourrait être tout d'abord réduit par thermolyse en monoxyde de carbone, puis combiné avec de l'hydrogène (obtenu par électrolyse de l'eau) dans un procédé Fisher-Tropsch afin de fournir le mélange d'alcane voulu. La suite du procédé serait alors plus ou moins identique, en utilisant l'oxygène produit également lors de l'électrolyse de l'eau afin de réaliser l'oxydation partielle de l'alcène.

Une autre voie similaire consiste à effectuer un reformage sec afin d'obtenir le mélange de gaz synthétique (CO/H₂) précurseur du procédé Fisher-Tropsch. Cette réaction consiste à faire réagir du CO₂ avec du méthane (obtenu par la réaction de Sabatier). La réaction étant endothermique, des températures élevées sont nécessaires à sa réalisation. Enfin, puisque le reformage sec ne permet pas d'obtenir le ratio CO/H₂ adéquat, il sera alors nécessaire de fournir un apport supplémentaire d'hydrogène, par exemple obtenu à partir d'électrolyse d'eau.

Une autre solution serait de passer par la voie biologique, en partant de l'éthanol (ou d'un autre alcool) produit par fermentation de biomasse. Pour des raisons pratiques, il est probable que l'alcool devrait être produit à partir des parties lignocellulosiques des plantes (biocarburant de deuxième génération), car les parties comestibles serviront sans doute presque exclusivement de nourriture à l'équipage. L'éthylène s'obtiendrait alors ensuite par déshydratation de l'alcool, un procédé connu et maîtrisé.

Toutes ces voies sont illustrées à la Figure 15.

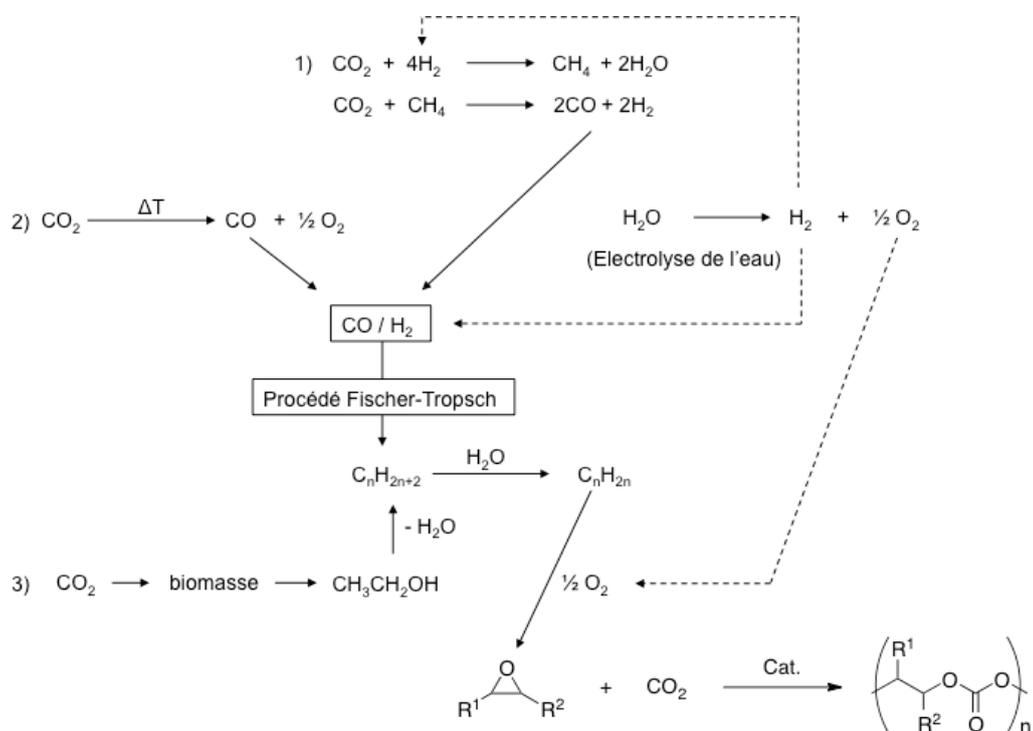


Figure 15: Les voies potentielles de production d'époxyde sur Mars.

1) Reformage sec de méthane 2) Réduction du CO_2 par thermolyse 3) Voie biologique, formation d'éthanol puis déshydratation de l'alcool.

✧ Les polymères de type polyuréthanes-amines

En changeant le co-réactif par une aziridine, le CO_2 peut également être transformé en un polymère de type polyuréthane (Figure 16). Bien que le rendement et la sélectivité de cette réaction ne soient pas encore optimaux et qu'elle se déroule en condition supercritique (Ihata et al. 2005) – difficile à reproduire dans un ECA –, le potentiel d'application de celle-ci est important. En effet, les polyuréthanes peuvent servir dans la confection de nombreux composés tels que mousses, peintures et colles.

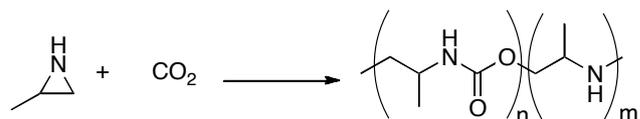


Figure 16: Synthèse de poly(uréthane-amine) à partir de CO_2 .

Au sujet des réactifs de départ, plusieurs voies de synthèse sont possibles pour l'obtention des aziridines.

Par exemple, la cyclisation d'un β -aminoalcool comme la monoéthanolamine sous catalyse acide permet la synthèse d'aziridine. De manière intéressante, la monoéthanolamine elle-même s'obtient par réaction d'ammoniaque avec un époxyde. Il serait ainsi envisageable de suivre des voies de synthèse similaires à celles décrites précédemment. Cependant, plusieurs autres méthodes permettent aussi de synthétiser des aziridines au laboratoire, et il est possible, voire probable, qu'une voie plus marginale soit plus appropriée dans le contexte d'un ECA.

Il faut également souligner que les aziridines sont des composés généralement toxiques, possédant des effets cancérigènes probables, ce qui restreint quelque peu le potentiel de leur utilisation dans un ECA.

✧ Les carbonates minéraux

La réaction du dioxyde de carbone avec des oxydes métalliques conduit à la formation de carbonates minéraux, tels que le carbonate de calcium ou de magnésium. Il s'agit d'ailleurs d'une stratégie évoquée pour son fort potentiel de séquestration du CO_2 sur Terre, puisque son manteau est constitué principalement de roches telles que l'olivine ou la serpentine qui contiennent entre autres des oxydes métalliques. D'après les premières analyses par sondes, il semble que de telles roches (p.ex. olivine) se trouvent aussi à la surface de Mars (Ody et al. 2013). Il serait donc assez opportun d'utiliser ces roches afin de produire des carbonates minéraux selon la réaction générale décrite à la Figure 17.

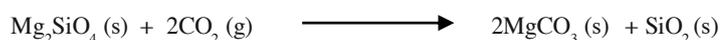


Figure 17: Équation générale de la réaction entre un silicate de magnésium et le CO_2 .

Comme le montre l'équation chimique ci-dessus, de l'oxyde de silicium est également produit durant le processus. Il serait donc pertinent de développer en parallèle une voie de valorisation pour ce sous-produit (fabrication de panneau solaire ou de verre, par exemple). Une autre caractéristique très intéressante de cette réaction est son exothermicité, qui permet de s'affranchir des contraintes énergétiques liées en général à la valorisation du CO_2 . Il serait même envisageable de récupérer la chaleur produite par la réaction afin de chauffer une partie des installations de la base spatiale. Par contre, la cinétique de la réaction est extrêmement lente dans les conditions présentées ici (réaction d'adsorption du CO_2 gazeux sur un solide). Sur Terre, il est proposé d'activer le substrat de départ par des méthodes physiques ou chimiques (broyage, extraction des cations magnésium à l'aide d'ammoniaque, etc.) et de travailler en phase liquide (MgOH_2) sous haute pression partielle de CO_2 (Zevenhoven et al. 2011). L'emploi d'un biocatalyseur tel que l'enzyme anhydrase carbonique permettrait aussi d'accélérer la vitesse de réaction, si celle-ci se déroule en condition aqueuse, à la manière dont certains organismes marins produisent leur coquillage (J. Z. Lee et al. 2007; S.-W. Lee et al. 2011). Dans le cadre d'une

station orbitale sur Mars, il reste donc à découvrir quelle serait la méthode la plus judicieuse pour augmenter la cinétique de la réaction en fonction des exigences liées au contexte de la mission.

Les carbonates formés ne possèdent pas une forte valeur ajoutée, mais pourraient malgré tout servir dans le secteur de la construction. Par exemple, le carbonate de calcium sert de matériau de départ dans la fabrication du ciment traditionnel (ciment de Portland), et de nombreuses recherches analysent actuellement les caractéristiques de ciments obtenus en remplaçant ce minéral par du carbonate de magnésium (Gartner & Macphee 2011).

❖ Les autres produits

Les produits chimiques évoqués ci-dessus, synthétisables à partir de CO₂ ou de biomasse ne sont en réalité que quelques exemples parmi les nombreuses valorisations possibles du dioxyde de carbone, comme le démontre la Figure 18 ci-dessous.

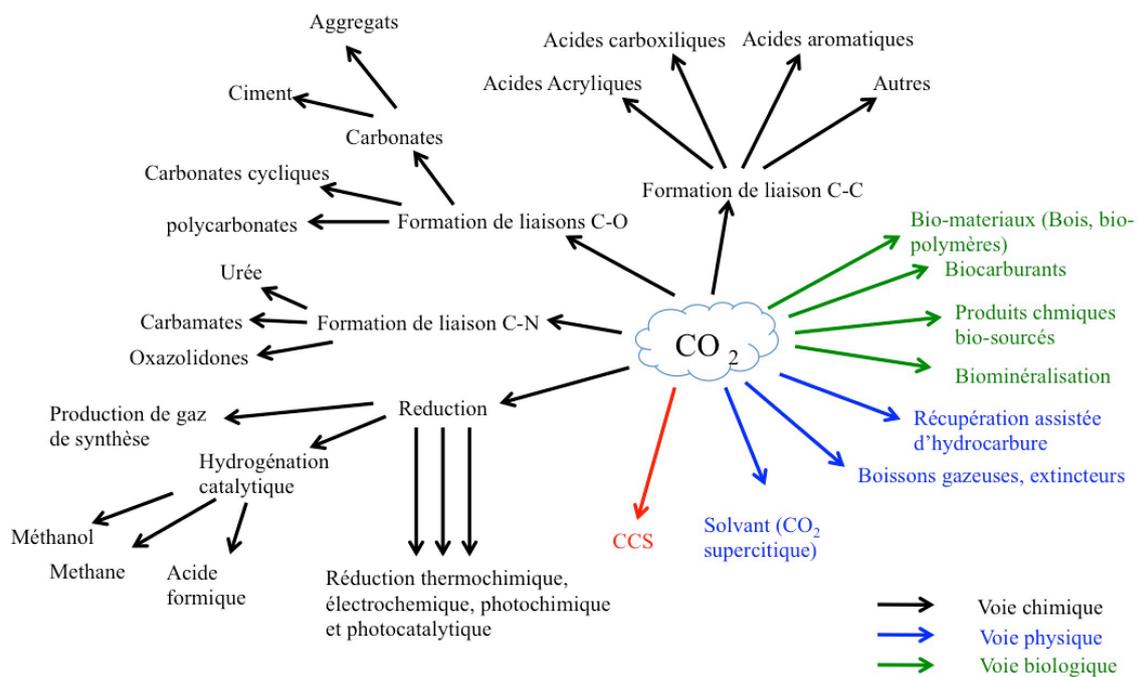


Figure 18: Panorama des voies de valorisation du CO₂.

Comme on le voit, la valorisation du dioxyde de carbone s'inscrit de manière pertinente dans le contexte des ECA. Le CO₂ de l'atmosphère martienne se révèle être une source de carbone pour la synthèse d'une multitude de composés organiques. Il conviendra de sélectionner les intermédiaires chimiques accessibles à partir de ce gaz puis d'optimiser les procédés permettant de les transformer en produits

finis utiles à la mission.

7.4.4 Le bioraffinage des coproduits de l'ECA

Lorsque la biomasse sortant des sous-systèmes d'un ECA ne peut être directement connectée à une autre unité de la boucle de l'ECA (un bioréacteur par exemple) et que des déchets organiques persistent, une option consiste à les éliminer via des procédés purement physico-chimiques. Leur incinération semble offrir des avantages en générant du dioxyde de carbone pour de futures photosynthèses. Mais la combustion de biomasse à 800°C dégage, outre le CO₂, des composés inorganiques comme le CO, le SO₂, ou des NO_x, et des composés organiques volatils comme le benzène. Même en quantités limitées, ces molécules se révèlent phytotoxiques pour les chambres de cultures en provoquant chez les végétaux une diminution notable de l'évapotranspiration, ainsi que du taux de photosynthèse net (Bubenheim et al. 1997). En conséquence, une valorisation thermique implique de devoir s'équiper des filtres pour se débarrasser des molécules coproduites, ou alors de passer par un traitement préalable de celles-ci.

Une stratégie de valorisation plus adéquate s'avère alors pertinente, à l'image du « bioraffinage », un domaine émergent cherchant précisément à valoriser plus largement les molécules organiques contenues dans la biomasse (Sonnenberg et al. 2007). Comme une raffinerie le fait à partir comme du pétrole, une bioraffinerie est à même de « synthétiser » des composés d'intérêt à partir de biomasse. Le bioraffinage englobe essentiellement trois voies de biosynthèse, qui permettent de produire de l'énergie (sous forme de biocarburants), des molécules à haute valeur ajoutée (comme des intermédiaires de synthèse chimique) et des matériaux (tels que des fibres végétales, des matériaux composites, ou encore des matériaux de construction). Ce chapitre passe en revue différentes opportunités offertes par ce concept, et ses techniques associées, pour la consolidation du métabolisme industriel, la biosynthèse de produits biosourcés et la chimie verte. En valorisant le carbone issu de parties non comestibles de plantes ou de résidus de bioréacteurs non réutilisables en tant que tels, les voies de valorisation par bioraffinage explorées ci-après s'inscrivent dans le sillon de l'écologie industrielle, en cherchant à éliminer la notion des déchets dans le contexte d'un ECA.

Dans une optique de mise en œuvre opérationnelle de l'écologie industrielle (§6.2.2), l'identification de bonnes associations d'organismes industriels permettrait de tester des applications industrielles intéressantes de produits biosourcés. En effet, le concept de « biocénoses » industrielles vise à déterminer les « espèces clés » d'un écosystème industriel lambda, par analogie aux associations d'êtres vivants qui caractérisent toujours un écosystème biologique donné (Erkman 2004). Par exemple, les centrales thermiques constituent à l'évidence l'une des principales « espèces » d'un tel écosystème. Il est possible d'envisager toute une série de complexes éco-industriels autour des centrales thermiques (au charbon, pétrole, gaz, mais aussi nucléaires), vu l'ampleur des flux de matière en jeu et la quantité considérable d'énergie gaspillée sous forme de chaleur (Erkman 2004).

Les « symbioses industrielles » engage des industries traditionnellement séparées dans une recherche collective de compétitivité permettant d'envisager de nouveaux échanges de coproduits à l'échelle d'un territoire (Chertow 2000), afin de mettre en réseau de nouveaux organismes industriels, qu'ils soient issus de l'industrie lourde (production d'énergie, de ciment, industrie pétrolière, chimique, papeterie, raffinage de métaux, etc.) ou d'autres activités économiques (agriculture, restauration, agroalimentaire, etc.). Au sein de l'écosystème industriel, les bioraffineries cherchent à accomplir une valorisation « matérielle » de la biomasse, en complément des traditionnelles mutualisations et échanges de flux de matières (gypse, soufre, sulfure, sulfate d'ammonium, acide sulfurique, chlorate d'ammonium, boues d'épuration, hydrogène, CO₂, solvants, etc.), d'eau (valorisation dans l'agriculture) et d'énergie (valorisation thermique de vapeurs, de chaleur, de biomasse) mis en place dans les réseaux éco-industriels traditionnels (Côté & Hall 1995).

Le bioraffinage permet ainsi de catalyser la mise en place d'un métabolisme industriel (§7.2.4), dans lequel les différents intermédiaires de synthèses chimiques issus de la biomasse s'intègrent (s'interconnectent) dans un réseau plus large de voies de valorisation des déchets. De nouveaux processus industriels peuvent être développés dans des bioraffineries industrielles afin de permettre de substituer les produits dérivés du pétrole.

Dans cette optique, le bioraffinage fait appel à des technologies, des mécanismes et des procédés réactionnels extrêmement variés (Octave & Thomas 2009). Ce concept repose sur un enjeu de « bioéconomie » où les coproduits et les déchets de l'un peuvent être utilisés par un autre acteur au niveau local, régional, voire même national, et représente un moyen de consolider le métabolisme industriel discuté précédemment, en densifiant les échanges, c'est-à-dire les maillons du réseau alimentaire industriel (§7.2.4). Ce domaine prometteur permet dès lors d'envisager une production industrielle de biomolécules d'intérêts ou de substances pharmaceutiques actives dans les secteurs de la cosmétique, de l'industrie plastique, papetière ou pharmaceutique.

Pour une catégorie donnée de déchets organiques, le pool de molécules à disposition est souvent exploitable par plusieurs technologies. Toutefois, les valorisations potentielles ne s'additionnent pas toujours, parfois un arbitrage de choix est nécessaire pour déterminer quelles alternatives utiliser, selon leur efficacité technique (rendement), économique (rentabilité) et/ou environnementale (réduction d'impact sur l'environnement). De plus, la qualité du déchet organique influence fortement le choix des technologies de valorisation. Ceux d'origines humaines (matières fécales) sont riches en fibres, déchets du métabolisme humain, toxines (urée), flore intestinale, micropolluants (cosmétiques, hormones, médicaments, pesticides, etc.). Quant à ceux issus des végétaux, leur contenu est plus riche en biomolécules d'intérêt, en polymères lignocellulosiques. Les excréments sont donc parfois moins bien adaptés que les déchets organiques provenant des parties non comestibles des plantes.

Un intérêt du bioraffinage réside dans la production d'énergies renouvelables, en particulier à partir de

la biomasse issues des effluents urbains ou des déchets ménagers²⁵⁰, sous la forme de biocarburants. Il est possible de catégoriser les biocarburants comme le bioéthanol, le biodiesel, le biogaz en distinguant ceux (Académie suisse des sciences techniques 2009):

- *de première génération* : produits à partir de sucres/amidon de maïs ou de betterave. Leur production concurrence les cultures agricoles destinées à alimenter l'homme, tout en présentant un écobilan à fort impact environnemental et une empreinte hydrique significative au vu de la forte consommation d'eau nécessaire à leur fabrication ;
- *de deuxième génération* : utilisant toute la plante, en particulier ses parties non comestibles (par exemple les fibres lignocellulosiques issues de l'agriculture et de l'exploitation forestière) ;
- *de troisième génération* : produisant des huiles à partir de micro-algues non comestibles, de cyanobactéries.

De nombreuses recherches visent à dompter les micro-organismes pour qu'ils produisent du biocarburant. Les algocarburants sont extraits des lipides de micro-algues d'élevage (Scott et al. 2010) et le mycodiesel est produit à partir de champignons microscopiques (Strobel et al. 2008). Des bactéries anammox (pour « anaerobic ammonium oxidation ») ont récemment produit du carburant pour fusées²⁵¹ (Kartal et al. 2012). Les matériaux lignocellulosiques et les extrants de photobioréacteurs de l'ECA sont des candidats de choix pour la production de biocarburants de deuxième et troisième génération. Un démonstrateur d'ECA pourrait de la sorte favoriser le développement d'algo-, myco- et bactériocarburants, s'il bénéficie d'un apport externe de CO₂ ou d'un excès de biomasse disponible après fixation de cette source de carbone par photosynthèse (voir §7.4.3.4.a), pour autant que cela ne préterite pas les autres fonctions de support-vie de l'ECA.

De nos jours, les déchets organiques (dont les excréments) sont surtout valorisés énergétiquement²⁵². Toutefois, ces derniers contiennent aussi des éléments valorisables qui permettent de fabriquer, à l'instar du pétrole, toute une gamme d'autres matières. C'est précisément pour cette raison que le concept du

²⁵⁰ En Suisse, l'épandage des boues d'épuration est interdit depuis 2006. Selon le recensement de 2012 de l'élimination des boues d'épuration de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), les enjeux en termes de volume restent immenses : quatre millions de tonnes de boues d'épuration liquides (soit environ 200'000 tonnes de matière sèche) sont par exemple produites par les STEP en Suisse chaque année. En termes d'échelle, il ne s'agit pas simplement d'une valorisation marginale de quelques dizaines ou centaines de tonnes de biomasse, mais bien de centaines de milliers, voire de millions de tonnes rien que pour un territoire comme la Suisse, lorsqu'on additionne toutes les sources de biomasse et de déchets organiques issues des effluents urbains. Toujours selon l'OFEV (<https://www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/dechets/en-bref.html>), le contenu des poubelles des ménages suisses (plusieurs millions de tonnes par année) contient près d'un tiers de déchets organiques méthanisables.

²⁵¹ Radboud University, Actualités du 02.10.2011, « Primeval anammox makes rocket fuel using an ancient recipe! »: www.ru.nl/english/general/news_agenda/news/redactionele/primeval-anammox/?mode=print

²⁵² Actuellement, la moitié de la matière solide dans les déchets contenant des fibres organiques est convertie en biogaz par les digesteurs conventionnels. La fraction solide restante a très peu, voire aucune valeur sur le marché et est souvent utilisée comme fertilisant des sols (slow-releasing soil fertiliser). N'en reste pas moins que la valorisation matérielle de cette fraction permettrait d'alléger la pression sur les engrais azotés et phosphorés. La production de biogaz (comme le méthane) peut par exemple être valorisée en électricité « verte », permettant l'économie d'une quantité significative d'énergies fossiles.

bioraffinage s'avère également approprié pour la biosynthèse de molécules à haute valeur ajoutée – mais aussi de matériaux divers – à partir de biomasse. À côté de la voie des biocarburants, le bioraffinage de biomasse provenant des cultures végétales permet la biosynthèse de « produits biosourcés » tels que (Menon & Rao 2012) :

- des produits à haute valeur ajoutée (produits pharmaceutiques, cosmétiques, additifs alimentaires) utilisables dans le secteur de la chimie fine ;
- des produits de spécialité (détergents, lubrifiants), ou encore des produits de commodité (polymères, intermédiaires chimiques, etc.) ;
- des matériaux composites (biosolides, biopolymères) pouvant servir de « briques » utilisables comme matériaux de construction (bâtiments, routes, etc.). Les produits biosourcés peuvent aussi être employés comme matériaux de base pour la production de verre, mais également dans des voies comme le luxe et la joaillerie (en quantité limitée dans ce dernier cas), et finalement pour la fabrication de cartons ou matériaux isolants à partir des déchets végétaux, en particulier grâce aux fibres végétales contenues de cette biomasse.

Ces produits biosourcés sont des alternatives à certains produits issus de voies pétrochimiques, pouvant jouer le rôle d'intermédiaires (bio)chimiques (ou « synthons ») pour la synthèse de produits chimiques, de solvants, de lubrifiants ou de pâtes, dont les industries pharmaceutiques, papeteries, plastiques ou métallurgiques sont gourmandes²⁵³. Dans ce cas, ils doivent présenter des fonctionnalités au moins équivalentes aux dérivés usuels du pétrole. Leur production est généralement basée sur des méthodes de production respectueuses de l'environnement (via l'emploi de procédés industriels de production propre ou la réduction des volumes de déchets et d'effluents en aval) et cherche à ouvrir des débouchés supplémentaires au monde agricole. Actuellement, les applications possibles des procédés de bioraffinage comprennent la synthèse :

- *de biopolymères issus de la biomasse (végétale, algale, animale, fongique)* : emballages, agriculture, restauration rapide (services, gobelets et assiettes), jouets (lolettes, biberons), secteur médical, hygiène (sparadrap), fibre et textile (matelas) ;
- *de biocomposites (matériau fabriqué à partir de résine et de fibres naturelles)* : emballages, ameublement (siège), automobile (vitres, tissu et mousse de siège de l'habitacle, partie de pneu), bâtiments (structures), produits divers (instruments, lunettes, etc.).

Au vu de ses multiples possibilités, Oïkosmos a tout intérêt à viser dès le départ l'intégration progressive

²⁵³ Ce qui n'empêche pas que certains de ces intermédiaires puissent être obtenus par des voies biosourcées ou d'origine fossile.

de voies de biosynthèse de produits biosourcés, pour la valorisation matérielle de la biomasse produite tant par les végétaux que par ses microbioréacteurs.

Dans le contexte des ECA, l'amélioration des procédés de ligninolyse permettrait par exemple de valoriser les fibres végétales non comestibles : la biodégradation et la bioconversion des biopolymères naturels qui composent les parois cellulaires végétales en coproduits utiles aux autres compartiments de l'ECA (Wertz & Bédué 2013; Lissens et al. 2004).

La valorisation des coproduits des ECA, comme le matériel lignocellulosique, pourrait tirer partie de l'ajout de bioréacteurs basés sur les agents microbiens du rumen. Trois communautés microbiennes majeures – les bactéries (genre *Fibrobacter* ou *Ruminococcus*), les protozoaires et les champignons –, sont outillées en enzymes à même de dégrader les polysaccharides des parois cellulaires végétales, en « découpant » les liaisons entre les différents polymères lignocellulosiques. L'hydrolyse enzymatique de la cellulose produit un matériel cellulolytique, composé par exemple de la cellobiose, du xylose, de la pectine et d'acides gras volatiles. Les hexoses sont ensuite fermentés pour donner du succinate, de l'acétate à partir de l'acétyl-CoA, du CO₂ à partir du pyruvate, du formiate. La lignine est quant à elle plus difficilement dégradée (voir le §4.2.1.2.b sur le compartiment I). Or, les exigences réglementaires européennes et suisses pour le traitement et la mise en décharge des déchets, deviennent de plus en plus strictes, aussi bien pour les déchets industriels que les déchets urbains. Les technologies de fermentation présentent un fort potentiel pour des applications alternatives au traitement « end-of pipe » permettant de réduire ou de complètement stériliser la fraction solide qui subsiste après la digestion anaérobique des déchets solides.

Enfin, un simulateur d'ECA pourrait intégrer des « fermes à cellulose » pour la fixation de carbone dans des composés organiques servant de matières premières pour la production de plastiques, de combustibles, de papier, de meubles et de matériaux de construction bâtiment (Volk & Rummel 1987). Dans cette perspective, un simulateur d'ECA offre la possibilité de déterminer les « bonnes » associations et les meilleurs panachages d'activités métaboliques des organismes de l'ECA, à l'image de synergies agro-industrielles.

À nouveau, le simulateur d'ECA a l'avantage de ne considérer aucune des matières produites par ses modules comme des déchets, mais toujours comme des ressources précieuses. Le concept du bioraffinage cherche précisément à tirer profit au maximum du potentiel des ECA à valoriser systématiquement tout co-produit sortant de ses compartiments et apparaissant au fur à mesure des voies réactionnelles de biosynthèse, dont on n'aurait pas encore identifié l'usage au sein de la boucle. Les synergies de recherche en ECA doivent faciliter le développement d'adaptations techniques permettant de convertir les molécules organiques en « building blocks » de voies de synthèse par bioraffinage. Tant les concepts de l'écologie industrielle que du bioraffinage permettent ainsi d'envisager des systèmes de support-vie allant au-delà d'un design simplifié d'ECA, en n'excluant pas l'emploi de plantes non

comestibles et sans chercher à vouloir réduire à tout prix le ratio de biomasse comestible vs non comestible. Pour que de tels procédés de bioraffinage puissent être industrialisables, le « scaling-up » implique une optimisation des voies de synthèses (bio)chimiques, voire l'utilisation de la biologie synthétique pour améliorer les rendements de productions, en créant de nouvelles fonctions métaboliques au sein des ECA (voir §8.2.8).

Si les faisabilités scientifiques et techniques sont prouvées, il est nécessaire de considérer également les aspects économiques, sociaux et éthiques de ces valorisations, en particulier celles faisant appel à la biologie synthétique (§8.2.8), dans une perspective de responsabilité sociétale. La valorisation à tout prix des déchets organiques sous toutes ses formes et/ou à grande échelle présente des limites. Par exemple, proposer des burgers aux excréments comme le font certains restaurants japonais ne semble pas suffisant pour une valorisation large des déchets organiques humains et soulève des problèmes à la fois sanitaires et d'acceptation sociale²⁵⁴. Si le bioraffinage utilise essentiellement (mais pas uniquement) des intrants de biomasse végétale, signalons toutefois que la chimie « végétale » n'est pas forcément synonyme de chimie « verte » : c'est par exemple le cas lorsqu'elle utilise des produits toxiques pour certaines catalyses ou pour la production de bioéthanol à partir de culture de maïs²⁵⁵.

La chimie verte est une approche émergente depuis quelques années qui cherche notamment à favoriser le plus souvent possible des réactions chimiques d'addition plutôt que des réactions de substitution, avec pour conséquence une minimisation ou une élimination des coproduits. Les « chimistes verts » peuvent être considérés comme les artisans de l'« économie de l'atome », qui vise à retrouver la fraction la plus grande possible des réactants dans les produits finaux. Les principes fondateurs de la chimie verte²⁵⁶, au nombre de douze, sont les suivants (Anastas & Warner 1998) :

- Prévenir et limiter la pollution à la source plutôt que devoir éliminer les déchets ;
- Économiser les atomes : optimiser l'incorporation des réactifs dans le produit final ;
- Concevoir des synthèses chimiques moins dangereuses qui utilisent et/ou conduisent à des produits peu ou pas toxiques ;
- Concevoir des produits chimiques plus sûrs : efficaces et moins toxiques ;
- Réduire l'utilisation de solvants et d'auxiliaires (comme les agents de séparation) ;
- Réduire la dépense énergétique: mise au point des méthodes de synthèse dans les conditions de température et de pression ambiantes ;

²⁵⁴ Lire à ce sujet l'article sur le site Gizmodo: gizmodo.com/5812276/would-you-eat-a-burger-made-from-poop. De telles démarches anecdotiques semblent plutôt devoir être considérées comme idéologiques (on « provoque » les consommateurs pour susciter un intérêt sur la problématique du recyclage des déchets, en leur proposant un produit « extrême ») ou marketing (on propose des produits extrêmes à des fins commerciales afin de faire parler de son entreprise et de drainer des clients).

²⁵⁵ La majorité de la production américaine actuelle de biocarburants de première génération exploite de tels procédés.

²⁵⁶ Issue de la chimie organique, cette discipline trace une feuille de route pour l'instauration systématique de ces principes à l'ensemble des activités économiques liées à l'industrie chimique.

- Utiliser des matières premières renouvelables au lieu de matières fossiles ;
- Réduire les produits dérivés (utilisation d'agents bloquants, protection/déprotection, etc.) qui peuvent notamment générer des déchets ;
- Utiliser les catalyses les plus efficaces et sélectives possibles ;
- Concevoir des substances en intégrant leur mode de dégradation finale, de sorte qu'elles se dissocient en produits de dégradation non nocifs, ne persistant pas dans l'environnement ;
- Mettre au point de méthodes d'analyse en temps réel pour prévenir la pollution en amont, avant la formation de substances toxiques ;
- Développer une chimie sécuritaire pour prévenir les accidents, les explosions, les incendies et les rejets.

Vu que sur Mars les processus de synthèse ne peuvent tous faire l'objet – du moins initialement – d'une utilisation des ressources *in situ*, l'approche de la chimie verte est intéressante, car elle permet de tendre vers une dématérialisation de la demande globale en réactants durant la mission. Ses principes semblent ainsi à même d'optimiser la masse à embarquer pour une mission d'exploration humaine. En outre, les ECA peuvent appliquer cette approche à l'échelle systémique.

A noter que les procédés de valorisation du CO₂ décrit plus haut n'optimisent pas tous l'application des principes de la chimie « verte » la réaction de Sabatier étant par exemple basée sur une forte dépense énergétique préalable liée de la production d'hydrogène.

Un simulateur d'ECA peut ambitionner de tester la faisabilité effective de la chimie verte dans un environnement sous fortes contraintes, avec au départ des variétés et des quantités limitées de ressources à disposition. Une telle installation offrirait ainsi l'opportunité d'explorer les frontières de la chimie verte, en revisitant ses définitions, afin de développer de nouvelles avancées et de nouveaux processus de chimie durable pour les systèmes de recyclage clos. Par exemple, l'intégration à la chimie verte de bioréacteurs cultivant des bactéries permettant d'améliorer l'« e-factor » (environmental-factor) de chaînes de procédés de l'ECA (Lapkin & Constable 2008), un facteur représentant la quantité totale de déchets par unité de produit. L'emploi combiné des technologies de bioraffinage, de chimie fine ou d'agriculture moléculaire pourrait s'avérer intéressant pour tenter de rapprocher l'e-factor au plus près de zéro, et ce dans les conditions les plus proches possibles de celles du vivant, c'est-à-dire des conditions ambiantes (faible température, faible pression, etc.).

Au sein d'un ECA, la circularisation des flux de matières permet aux réactions chimiques de ne plus être vues comme linéaires et indépendantes les unes des autres, puisque les coproduits sont quasi systématiquement utilisés comme réactants dans un autre procédé, au sein d'un mini réseau éco-industriel. Les principes de la chimie verte aideront à l'établissement de critères de sélection des substances entrant dans l'ECA, afin de déterminer celles devant être remplacées par des substances ou

des procédés moins dangereux, en termes de toxicité (§7.3.3.2.c), de persistance dans l'écosystème, de mobilité ou encore de bioaccumulation (§7.3.3.2.d).

La chimie verte se profile comme une discipline complémentaire aux stratégies de bioraffinage et de valorisation du CO₂, dont elle partage également des points communs. Ensemble, elles permettent d'envisager un bioraffinage « responsable » et offrent des principes et outils adéquats pour l'étude des systèmes clos dans la perspective de l'écologie industrielle.

8 Investigations aux frontières de la recherche en biologie systémique

8.1 Les synergies de recherche liées au champ de la biologie systémique

Artificialiser les écosystèmes à l'extrême implique de maximiser la performance de leur fonctionnement et d'optimiser la surveillance des organismes y évoluant. Le contexte d'Oïkosmos rend judicieux le suivi simultané des facteurs déterminant l'état de santé en habitat clos. Comme on l'a détaillé au §7.3, la biosurveillance de la santé de l'ECA nécessite le monitoring fin de son exposome. Ce dernier englobe, en plus des conditions physicochimiques, les microbes, micropolluants, médicaments ou autres molécules bioactives telles que les hormones et protéines présentes à un instant donné dans le système et auxquelles les organismes de l'écosystème sont soumis dans leur environnement immédiat. Il s'agit d'investiguer, avec une approche systémique (§5.1.3.1), les effets des conditions environnementales sur le milieu interne des organismes de l'ECA²⁵⁷, et en particulier les modifications induites par l'exposome sur le contenu génomique mais aussi épigénomique²⁵⁸, ainsi que les réponses métaboliques associées.

Ce chapitre cherche à démontrer l'apport des disciplines associées au champ de la biologie systémique pour surveiller en continu la santé globale des organismes d'un ECA. Comme introduit au §6.3, la biologie systémique est une branche des sciences modernes qui souhaite améliorer significativement la compréhension des interactions dynamiques entre les molécules organiques et les composants cellulaires qui se déroulent au sein d'un système biologique. Les méthodologies et outils issus de ce champ disciplinaire offrent un cadre d'analyse pertinent pour étudier les répercussions des conditions écosystémiques sur le fonctionnement des organismes vivants de l'ECA. En particulier, les sciences omiques rendent possible une biosurveillance de la santé de l'homme évoluant en habitat clos, des micro-organismes des (photo)bioréacteurs, et des plantes cultivées dans des chambres végétales.

Dans le cadre du programme Oïkosmos, les synergies de recherche appropriées liées à la biologie systémique portent sur l'analyse et le suivi des flux de molécules composant les organismes et/ou circulant au sein d'écosystèmes et en particulier dans un démonstrateur d'habitat clos. Cette étude considère comme prioritaire l'intégration des approches, méthodologies et technologies omiques suivantes : la génomique, la transcriptomique, la protéomique et la métabolomique, ainsi que la nutriginomique et la microbiomique. Celles-ci permettent de détecter, localiser et/ou monitorer les éléments de l'ECA tels que : les gènes et les séquences régulatrices de l'épigénome impliqués dans le maintien de la bonne santé des cellules des organismes de l'ECA ; les molécules (résidus d'hormones ou de médicaments, micropolluants et autres contaminants) circulant dans l'ECA auxquelles seront

²⁵⁷ Le milieu interne de l'homme comprend par exemple le cytoplasme cellulaire des tissus et les fluides physiologiques comme le liquide interstitiel, le sang, la lymphe et le liquide céphalorachidien.

²⁵⁸ L'épigénomique porte sur la régulation de l'expression génique liée à l'ADN non codant (voir §8.3.2.1).

exposées les membres de l'équipage et les autres organismes de l'écosystème ; les micro-organismes des bioréacteurs et ceux présents dans les flux liquides, l'air et les surfaces de l'habitat clos.

Les synergies de recherche discutées dans les prochaines sections sont découpées thématiquement en deux parties :

- la biosurveillance et le maintien de la santé des organismes : de la génomique à la métabolomique (§8.2) ;
- la nutrition : de la production de nourriture aux approches nutriginomique et microbiomique (§8.3).

8.2 La biosurveillance et le maintien de la santé des organismes : de la génomique à la métabolomique

La complexité restreinte d'un ECA, basée sur une taille réduite et un nombre limité d'espèces par rapport aux écosystèmes naturels, facilite son contrôle, la détection précoce d'altérations y survenant, ainsi que leur correction rapide. Toutefois, la simplicité de leur structure les rend plus vulnérables que les écosystèmes terrestres (§7.3.3), et les premiers ECA envoyés en orbite seront vraisemblablement fragiles.

Si la sélection minutieuse d'un petit nombre d'organismes préexistants sur terre, selon leur capacité à répondre aux besoins de l'homme, sera nécessaire, elle ne suffira pas forcément à assurer la stabilité d'un ECA²⁵⁹. Peu importe les combinaisons d'espèces et de systèmes physico-chimiques trouvées, les opérations de l'ECA devront être monitorées en permanence afin d'anticiper tout déséquilibre mettant en danger le système.

Dans ce contexte, les outils de la biologie moléculaire et de la génomique seront utiles à la mise en place, au suivi et au maintien des ECA développés dans le contexte spatial. Par exemple, il est tout à fait réaliste d'envisager un séquençage à intervalles réguliers des génomes²⁶⁰ de tous les micro-organismes composant l'ECA afin de déterminer avec précision la proportion de chaque espèce et de ce fait contrôler le bon équilibre du biotope sur plusieurs de ces aspects.

Dans la perspective des ECA, la biosurveillance et le maintien de la santé des organismes fait notamment appel aux domaines de recherche omique et non omique suivants :

- l'intégration des approches omiques à la sélection génétique de l'équipage (§8.2.1) ;
- l'analyse des voies de régulation et de la dynamique des génomes de l'ECA (§8.2.2) ;
- l'étude des phénomènes de transfert horizontal de gènes dans l'ECA (§8.2.3) ;
- l'interdépendance entre l'exposome et les processus biologiques de l'ECA (§8.2.4) ;
- la métabolomique : l'analyse des effets de l'exposome sur les voies métaboliques (§8.2.5) ;
- la recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (§8.2.6) ;

²⁵⁹ En effet, certaines espèces peuvent présenter des propriétés intéressantes pour une partie du système et néfastes pour d'autres. Une bactérie extrêmement efficace pour l'épuration des eaux usées pourrait rejeter dans son milieu des substances toxiques à certaines algues utiles à la production d'oxygène. Dans un tel cas, la création d'organismes génétiquement modifiés, voire même d'organismes synthétiques pourrait s'avérer utile, en permettant l'introduction dans le génome de l'algue d'un gène qui lui conférerait une résistance aux toxines de la bactérie. À l'inverse, il est possible d'imaginer modifier le génome de la bactérie à fin de limiter sa production de toxine. Néanmoins, un ECA peuplé de micro-organismes paraît peu fiable à d'autres égards. Leurs génomes vont inévitablement accumuler des mutations, dont certaines se fixeront dans les populations, modifiant petit à petit le biotope, jusqu'au potentiel effondrement du bioréacteur, pouvant entraîner celui du système entier d'une manière imprévisible. Sans compter les risques liés aux éléments génétiques mobiles à même de faire apparaître des souches virulentes dans le système.

²⁶⁰ Les séquenceurs d'ADN de dernière génération pourront être utilisés dans ce but. Afin de prendre la mesure des progrès réalisés, rappelons que la nouvelle génération de ces machines permettent aujourd'hui le séquençage de génomes à bas coûts et en quelques heures seulement (voir §6.3.1).

- la physiologie de l'exercice : une approche non omique pour le maintien de l'homme en bonne santé (§8.2.7) ;
- la biologie synthétique : vers la création de fonctions métaboliques sur mesure pour les ECA (§8.2.8).

Outre les technologies omiques listées ci-dessus, le §8.3.2 discutera sur leurs implications pour la nutriginomique et la médecine génomique, tandis que la microbiomique sera abordée au §8.3.3.

8.2.1 L'intégration des approches omiques à la sélection génétique de l'équipage

Les progrès de la biologie systémique doivent permettre à moyen terme d'élaborer un ECA capable de faire vivre plusieurs astronautes pendant des années sans assistance terrestre. Le développement d'un tel ECA nécessitera la sélection des organismes les plus adaptés à évoluer en habitat clos, et capables de tirer parti des conditions extrêmes de l'écosystème. Dès lors se pose la question de l'intégration des critères génétiques à la sélection de l'équipage, tant techniquement qu'éthiquement – afin que l'homme puisse s'insérer au mieux au sein de l'ECA et travailler le plus efficacement avec les autres participants à la mission ?

L'établissement de diagnostic génétique est d'ores et déjà pratiqué couramment chez certains patients atteints de maladies simples à détecter (comme la Mucoviscidose, la maladie de Charcot-Marie-Tooth, ou celle de Tay-Sachs...) et beaucoup d'études ont réussi également à déterminer des profils génétiques à risques pour certaines maladies comme Alzheimer, la schizophrénie ou certains cancers. Les personnes porteuses de ces profils génétiques « à risque » n'impliquent aucunement qu'elles développeront ces maladies, mais signifient simplement qu'elles auront statistiquement plus de chance que la moyenne de contracter ces maladies. Dans ces cas, faudrait-il pour autant autoriser la discrimination à l'embauche ? La perspective d'une société où l'analyse génétique deviendrait à terme un test de routine lors du recrutement de personnel dans certains secteurs d'activités n'est pas utopique (Hill 2009), même si elle est actuellement jugée peu souhaitable par beaucoup (Douay 2003), et souvent interdite, comme par exemple aux Etats-Unis par le « Genetic Information Nondiscrimination Act » de 2008, et s'applique à la sélection des astronautes par la NASA.

Néanmoins, les progrès du profilage génétique auront sans aucun doute des répercussions dans les processus de sélection de futurs équipages. Surtout qu'une telle sélection est déjà pratiquée d'une manière indirecte. Les futurs astronautes doivent passer toute une batterie de tests déterminant leurs aptitudes à survivre et à prendre les bonnes décisions dans le cadre de missions spatiales. Cette sélection est basée sur des critères médicaux, physiques et psychologiques, tous influencés fortement par le génome des candidats. Et rien ne devrait empêcher l'utilisation d'autres technologies omiques comme

la protéomique ou la métabolomique pour tester les réactions d'un équipage soumis à des conditions similaires aux habitats spatiaux.

Pour une mission spatiale de plusieurs années, il vaudra mieux éviter de sélectionner des personnes qui risqueront de développer un cancer ou un comportement schizophrénique. En principe, les personnes prêtes à se former et s'entraîner à vivre pendant plusieurs années dans un habitat spatial, dans des conditions d'extrême promiscuité, coupés de tout lien familial, et sachant pertinemment que leur retour n'est pas forcément certain, accepteront mieux que de tels protocoles de sélection génétique soient appliqués pour maximiser leur chance de survie et le succès de la mission. Mais les études démontrant une augmentation des risques pour une maladie sont faites sur des cohortes d'individus et ne peuvent souvent strictement rien conclure sur une personne isolée. Et même si nous pouvions rétroactivement déterminer un lien de cause à effet entre le profil génétique d'individus ayant développé une pathologie non compatibles avec un long voyage spatial, cela ne voudrait pas dire que toute personne possédant ce profil contracterait inévitablement cette maladie. Pour en être sûr, il faudrait montrer que la fréquence de cette maladie est nulle ou très faible parmi la population d'individus présentant le profil génétique en question. C'est techniquement possible, mais difficile à réaliser, car il faudrait tester un grand nombre d'individus. Actuellement, il paraît complexe de sélectionner un futur équipage sur la base de critères génétiques pertinents de manière fiable, mais la science évolue vite et ces techniques pourraient devenir un jour une réalité.

Dans le cadre d'Oïkosmos, si la biologie systémique ne semble pas cruciale pour ce processus de sélection de l'équipage, elle pourrait néanmoins présenter un potentiel et un intérêt pour consolider les processus traditionnels de sélection. D'autant plus que le nombre de candidats dont les gènes pourraient faire l'objet d'une analyse pourrait être relativement élevé lors de la sélection des membres de l'équipage. Le « pool » de génomes pourrait bien compter plusieurs centaines, voire plusieurs milliers d'entrées à prendre en considération. Le déroulement d'une campagne de simulation, ou d'une mission habitée vers Mars, ne concerneront quant à eux qu'une poignée de participants puis d'astronautes. N'en reste pas moins qu'il sera possible de capitaliser sur le savoir omique accumulé mission après mission (campagnes de simulation au sol incluses), et les retours sur l'influence de la vie en habitat clos durant de longues périodes sur les profils génétiques et épigénétiques des candidats et des astronautes. Sont concernées : les susceptibilités génétiques prédisposant à développer des maladies durant la mission, mais aussi les profils présentant un génotype favorable, c'est-à-dire un risque réduit de développer une maladie si des conditions défavorables (mais pour des circonstances prévisibles) se mettaient en place sur de longues durées durant la mission (Jirtle & Skinner 2007).

Nul doute que la mise au point d'un protocole complet de sélection génétique d'un équipage nécessitera encore beaucoup de recherches. D'ici là, on peut tout de même envisager que les données omiques humaines soient utilisées initialement comme critères de sélection des futurs astronautes, afin d'éviter que des candidats présentent des versions (allèles) de leur gènes moins favorables à la vie en conditions

extrêmes que d'autres. Ces biomarqueurs génétiques interviennent par exemple dans les voies enzymatiques régulant les cycles circadiens, dans la métabolisation de certains aliments, ou encore 3) dans des processus physiopathologiques. Dans ce dernier cas, on pense en premier lieu aux gènes impliqués dans des processus impactés par la microgravité, ou à d'autres aspects liés aux contraintes spécifiques du spatial. Les porteurs d'allèles « problématiques », dont on suppose par exemple qu'ils favorisent l'apparition d'ostéoporose, pourraient être exclus d'office, même sans preuve irrévocable, simplement pour réduire au maximum les risques de voir cette pathologie se développer.

8.2.2 L'analyse des voies de régulation et de la dynamique des génomes de l'ECA

Peut-on considérer la virulence bactérienne comme un obstacle à de longs séjours en espace ? Des expériences sur celle contrôlée par le gène *hfq* semblent le suggérer, comme tente de le démontrer dans les prochains paragraphes la réflexion du Dr. Claude-Alain Roten (Genometrics Consulting) : « Wilson et al. (2007) ont montré pour la première fois un changement de comportement bactérien après croissance en orbite. Des *Salmonella enterica* serovar Typhimurium sont devenues plus virulentes en microgravité (croissance dans la station spatiale internationale ISS et dans des conditions au sol de microgravité, à savoir : « rotating wall vessel », RMW ou « low-shear modeled microgravity », LSMMG) qu'en gravité terrestre. Les expériences en orbite ont montré une accumulation de matrice extracellulaire associable à l'apparition d'un biofilm, ainsi qu'une augmentation de la virulence bactérienne chez les souris infectées. Le gène *hfq* responsable de ce changement de virulence a été mis en évidence par des analyses microarray et protéomiques. Ce gène qui code pour une protéine se liant à l'ARN agit comme un régulateur global. Wilson et son équipe proposent de développer des stratégies ciblant le gène *hfq* afin de décroître les risques infectieux durant les missions spatiales et de fournir de nouvelles perspectives thérapeutiques. Les analyses de contenus génomiques ont montré que le gène en question se retrouve dans d'autres génomes bactériens comme celui de *Pseudomonas aeruginosa* où il affecte de façon similaire le comportement de la bactérie. ». Si le fonctionnement du gène *hfq* est bien documenté, il n'en est pas de même pour la compréhension de l'avantage donné par le fonctionnement de ce gène qui sert, entre autres, d'accéléromètre à la bactérie. Quel est l'intérêt pour la bactérie de déréprimer sa virulence en microgravité ? Dans quelles conditions est le gène *hfq* actif sur Terre ? Afin d'y répondre, l'idée est de quantifier l'expression de ce gène en observant les salmonelles en milieu naturel, c'est-à-dire dans l'environnement et en interaction avec son hôte animal, afin de retrouver sur Terre des conditions similaires à celles subies par les salmonelles en microgravité. Cette compréhension de l'avantage sélectif apporté à la salmonelle par *hfq*, permettrait de développer de nouvelles approches de contrôle. Un tel projet se construirait autour d'équipes multidisciplinaires capables de documenter et de reproduire l'environnement de la salmonelle. Un savoir-faire microbiologique, écologique, vétérinaire et médical serait ainsi mobilisé en partenariat avec des ingénieurs. En reproduisant sur Terre des situations induisant la virulence après une croissance en microgravité, ce projet apporterait des

réponses aux risques infectieux pris par les astronautes lors d'un séjour dans l'espace, qu'ils soient en orbite basse autour de la Terre ou associés à une mission d'exploration du système solaire. Les résultats de ces manipulations expérimentales sont de nature à intéresser les agences spatiales qui emploient des astronautes. La validation des techniques de détection de ces virulences bactériennes dans un simulateur au sol améliorera l'évaluation de la santé des micro-organismes, y compris ceux des (photo)bioréacteurs de l'ECA.

Avec les avancées récentes en transcriptomique et protéomique, introduites au §6.3.2, il devient possible de mesurer simultanément les niveaux de transcription de chaque ARN messager (ARNm) et les niveaux d'expression de chaque protéine dans une cellule soumise à des perturbations environnementales ou génétiques. L'étude en ECA des corrélations entre les niveaux d'ARNm et d'expression protéique, aussi bien chez les levures, des bactéries ou des lignées humaines s'avère cruciale pour accélérer l'établissement de diagnostics biomédicaux et avertir de manière réactive tout problème détecté par les systèmes d'alerte précoce en place.

De même, la transcriptomique permet d'étudier l'influence des petits ARN non codant bactériens (« bacterial small RNA » ou sRNA en anglais) sur la régulation de la virulence bactérienne, et présente ainsi un potentiel pour un contrôle de la qualité microbiologique des bioréacteurs de l'ECA. En effet, ces petits ARN peuvent lier des protéines et altérer leur fonction, ou alors s'hybrider à des ARNm et conséquemment influencer l'expression de gènes. Or, l'importance de la régulation transcriptionnelle et post-transcriptionnelle par les sRNA a récemment été reconnue aussi bien chez les procaryotes que chez les eucaryotes (Shimoni et al. 2007). Les voies de régulations concernées semblent bien plus étendues qu'on ne l'imaginait jusqu'ici. Elles concernent aussi bien des gènes de virulence que ceux impliqués dans les processus de maintenance cellulaire de base – appelés les « house keeping genes » –, ainsi que d'autres intervenants dans le quorum sensing (§10.5) ou dans la régulation de la réponse au stress. L'influence des sRNA sur l'expression et la fonction des protéines s'exerce généralement en réponse à des variations des conditions environnementales (comme la température ou le pH) ou du taux de métabolites (Gripenland et al. 2010). Ceci démontre l'intérêt de se pencher sur le rôle de ces molécules régulatrices dans le contexte des ECA, afin d'améliorer notre compréhension des mécanismes intervenants dans la régulation fine de l'expression génique des organismes de l'écosystème. Certains auteurs n'ont pas hésité à parler de révolution massive dans ce domaine de « transcriptomique bactérienne » (Güell et al. 2011). Une révolution à nouveau rendue possible par l'essor des capacités de séquençage et des nouveaux outils biomédicaux disponibles (§6.3). Par voie de conséquence, la dynamique des transcriptomes de l'ECA devrait faire l'objet d'une surveillance attentive, parce qu'elle semble cruciale dans les processus impliqués dans la pathogenèse des micro-organismes. Protéger l'équipage implique non seulement de prévenir l'apparition de souches pathogéniques, mais aussi de garantir le fonctionnement adéquat des bioprocédés du LSS d'un point de vue opérationnel (rendement,

qualité de la biomasse, etc.). Soulignons que les études citées ci-dessus indiquent que la complexité des transcriptomes bactériens reflète plus que prévu celles des eucaryotes, de par : la présence de sRNA ; de promoteur de régulation ; de transcrits alternatifs et d'épissage de l'ARN ; une certaine similarité dans la localisation de la traduction ; l'existence de modifications épigénétiques ; et enfin l'impact de la structure chromatinienne sur la régulation de la transcription. Autant d'aspects de l'expression des gènes et des protéines à investiguer de manière approfondie en système clos pour assurer la bonne santé des bioréacteurs. On entrevoit alors bien l'importance des outils de la biologie systémique pour la recherche en ECA.

Par ailleurs, il est maintenant devenu commun d'évaluer la réponse d'une cellule à n'importe quel stimulus, en analysant les changements de l'ensemble de son transcriptome ou les variations de l'expression de ses régulateurs, qui incluent les micro-ARNs. Ces derniers sont impliqués dans des maladies comme le cancer, le diabète ou l'Alzheimer, en bloquant l'expression de certains gènes. En 2012, Cell Research a publié une étude chinoise montrant que des résidus d'ARN d'origine végétale ont été retrouvés dans les organes et le sang des personnes qui les ont consommés (Zhang et al. 2012). L'étude montre que ces micro-ARN végétaux sont capables de résister in vivo à la digestion et d'influer sur les fonctions des cellules humaines. Si ces résultats méritent d'être approfondis, ils tendent à prouver que nous ne mangeons pas uniquement les protéines, lipides et les glucides et les vitamines, mais aussi des régulateurs de gènes. Il s'agit donc de se pencher sur les moyens d'identifier rapidement ces régulateurs et leurs circuits de signalisation, dont les dysfonctions entraînent des réponses anormales. En particulier, si les ECA devaient utiliser des OGM, il faudrait vérifier si l'ADN inséré dans le génome agit – via des micro-ARN – sur la traduction d'autres protéines que celles qu'il est censé coder. La bioinformatique (§9.2) offre des outils pertinents pour prévoir si un micro-ARN peut accidentellement bloquer l'expression des gènes humains.

Ajoutons encore que la transcriptomique est aussi quasi indispensable pour la nutrigenomique, afin : d'étudier les effets bénéfiques ou néfastes d'aliments sur la santé ; de caractériser les mécanismes moléculaires influencés par le régime alimentaire ; et d'identifier des marqueurs biologiques, à savoir des substances utilisées comme indicateurs de changements biologiques ou physiologiques à des stades précoces d'apparition de maladies ou de dérèglements métaboliques (voir §8.3.2.2).

Pour toutes ces raisons, il paraît clair que les technologies omiques associées à l'étude du transcriptome et du protéome seront d'une grande utilité pour l'analyse tant des voies de régulation et de la dynamique des génomes de l'ECA.

De telles investigations sont indispensables pour garantir la stabilité génétique des organismes dans le contexte d'Oïkosmos, afin de maîtriser les risques biologiques et chimiques (§7.3.3.1) et d'éviter les phénomènes d'oscillation et de divergence (§7.3.3.2).

8.2.3 L'étude des phénomènes de transfert horizontal de gènes dans l'ECA

En plus des petits ARN bactériens, un autre phénomène peut être responsable de l'apparition de pathogénies virulentes chez les micro-organismes : le transfert horizontal de gènes (Gogarten & Townsend 2005). Les éléments génétiques mobiles impliqués comprennent des vecteurs variés, puisqu'ils peuvent être transférés aussi bien par des plasmides (ADN circulaires) et des transposons (Leplae 2004), que par des phages, c'est-à-dire des virus bactériens (Samson et al. 2013). Sur Terre, la présence de bactéries est effectivement corrélée quasi systématiquement avec celle de bactériophages. Des études récentes ont déterminé qu'approximativement, il faut compter sur l'existence de dix phages par procaryote (Martha RJ Clokie 2011). Or, on estime que l'abondance terrestre de ces derniers se situe autour des 10^{30} cellules (Whitman et al. 1998), soit le chiffre astronomique de mille milliards de milliards de milliards de cellules ! Les bactériophages seraient donc les « organismes » les plus abondants de la planète. Et leur contribution à la diversité bactérienne est significative. Ce « mobilome » comprend donc des éléments génétiques mobiles d'origine bactérienne, mais aussi virale (Frost et al. 2005). Sa composition modulaire lui confère une capacité à établir des transferts horizontaux de matériel génétique. La recherche en ECA sur ce thème approfondira nos connaissances sur les processus d'évolution et d'adaptation bactérienne en système clos.

Autre exemple, les îlots génomiques (« genomic island » en anglais) sont des parties de génome – généralement de micro-organismes – dont l'origine est horizontale. Autrement dit, s'il est « fixé » dans le chromosome bactérien, cet ADN a par le passé été mobile. Et ces relations peuvent être déterminées par des estimations phylogéniques. Un même îlot génétique peut se retrouver dans des espèces relativement éloignées, à l'issue de types variés de transferts génétiques latéraux comme la conjugaison (transmission ou de plasmide bactérien entrant en contact par l'intermédiaire d'un pilus), la transformation (intégration d'un brin d'ADN du milieu à l'intérieur d'une de la cellule) et la transduction (transfert d'ADN via un vecteur viral tel qu'un bactériophage). Ces capacités bactériennes d'interchanger leur contenu génétique dans des proportions insoupçonnées a des implications importantes pour les microbiologistes comme le dénote Goldenfeld et Woese dans Science (2007). Une publication de Frost et ses collègues considère quant à elle les éléments génétiques mobiles comme « les agents d'une évolution open source » dans un article paru dans la revue Nature Reviews Microbiology (Frost et al. 2005). En outre, les séquences codées par ces éléments peuvent être impliquées dans de nombreuses fonctions microbiennes, en particulier dans la pathogénèse (Hacker & Carniel 2001), les processus d'adaptation et la réponse bactérienne aux variations des conditions environnementales (Dobrindt et al. 2004). Ils peuvent donc présenter un danger puisqu'ils peuvent amener des bactéries à devenir virulentes, mais également représenter une opportunité pour le développement de biotechnologies environnementales et de technique de bioremédiation, sur la base de leur capacité à dégrader des composés chimiques de synthèse.

Dans le cadre d'Oïkosmos, il s'agit donc de prévenir autant que possible toute déstabilisation potentielle de la boucle de l'ECA par certains de ces éléments génétiques mobiles. Par exemple, toute dégradation de la qualité sanitaire de microalgues comme la spiruline doit être identifiée précocement, si cette cyanobactérie devenait non comestible par transfert horizontal. Or, il est difficile d'empêcher aux éléments génétiques mobiles de sortir d'un bioréacteur de l'ECA. En effet, alors que la taille d'une bactérie est de l'ordre du micron (1 μm), on peut estimer que le diamètre de certains plasmides circulaires « en pelote » pourrait ne pas excéder 10 à 20 nanomètres (nm), selon le nombre total de bases nucléiques qu'il contient (un gène en contient de plusieurs centaines à quelques milliers) et avec une épaisseur de l'hélice d'ADN à de 2 nm. Un bactériophage mesure quant à lui de l'ordre de 20 à 50 nm. Compte tenu de ces dimensions, impossible de garantir que certains éléments du mobilome seront systématiquement bloqués par les membranes de filtration en présence aux interfaces entre les compartiments. Précisons enfin qu'un transfert horizontal de gènes de plantes transgéniques vers des bactéries est possible (Nielsen & Townsend 2004). Un risque écologique à ne pas oublier en cas d'intégration de plantes recombinantes dans l'ECA.

Dans le contexte des systèmes clos, une compréhension plus exacte des mécanismes de transferts génétiques pourrait s'avérer cruciale, car ceux-ci peuvent causer des problèmes de fonctionnement de l'ECA, en permettant la propagation par exemple de gènes de résistance aux antibiotiques ou à certains enzymes de restrictions. Nul doute que les technologies omiques seront d'une grande utilité pour étudier ces phénomènes de transfert horizontal de fragments d'ADN, aussi bien pour établir des systèmes de détection précoce, que pour surveiller attentivement l'évolution des génomes au sein de l'ECA, que ce soit à court, moyen ou long terme.

8.2.4 L'interdépendance entre l'exposome et les processus biologiques de l'ECA

Par essence, les processus biologiques de l'écosystème sont fortement dépendants de l'environnement (température, pH, salinité, agitation, radiation, etc.), qui influence non seulement la cinétique, la communauté microbienne, la qualité de la biomasse végétale produite, mais également le contenu génétique, protéomique et métabolomique de l'ECA (Ilgrande et al. 2018). Concrètement, la nature de ces processus peut ainsi changer rapidement suite à l'introduction d'un aliment, d'un médicament, ou suite à une perturbation (présence d'un contaminant chimique, variation d'un paramètre physique, etc.). Autrement dit, outre les effets biologiques induits par la variation imprévue des conditions (éco)toxicologiques durant la mission, d'autres peuvent être causés par la modification nécessaire de paramètres contrôlables par les utilisateurs de l'ECA.

Un simulateur d'ECA se profile comme une plateforme d'évaluation continue de l'influence et des effets de l'exposome (§7.3) dans lesquels « baignent » et évoluent les êtres vivants d'un écosystème. La biosurveillance de la santé porte essentiellement sur l'analyse et le suivi des réponses biologiques

induites par des variations de l'exposome sur les organismes de l'ECA, alors que la constance des paramètres environnementaux n'est pas nécessairement garantie ni souhaitable. De plus, les conditions de routine seront adaptées selon les phases de la mission (voyage vs implantation sur sol martien) ou de croissance des plantes par exemple. Dans la littérature actuelle, les notions de « responsome » ou encore de « réactome » permettent de qualifier l'ensemble des impacts *directs* de l'exposome – mais aussi *indirects* en cas de mutations causées par ce dernier – sur les voies métaboliques et les procédés biochimiques des organismes composant un écosystème tel qu'un ECA.

Quelles que soient les perturbations ou les modifications volontaires influençant l'ECA, il devient alors crucial d'éviter des réponses biologiques inadaptées de ses organismes, tant pour le maintien de l'homéostasie des organismes (individuellement), que pour l'équilibre de l'ECA dans son ensemble, il est par conséquent indispensable d'analyser le plus précocement possible les réponses, les effets et les impacts de l'exposome sur le « responsome » global des organismes de l'ECA (Vlaanderen et al. 2010).

En clair, l'enjeu de la biosurveillance des organismes de l'ECA est bien de favoriser l'identification la plus en amont possible les perturbations de l'exposome pouvant amener à un fonctionnement inhabituel, non désiré, et potentiellement risqué de n'importe lequel des compartiments de l'ECA.

Dans sa publication dans le journal *Science*, Baliga (Baliga 2008) explore les mécanismes de l'évolution qui ont permis la mise en place et l'assemblage de réseaux biologiques (génétiques, protéiniques, métaboliques). Selon la chercheuse, les modèles prédictifs doivent être établis en associant les réseaux biologiques et environnementaux. Autrement dit, les deux systèmes étant imbriqués telles les roues d'un engrenage, la prédiction de réponses cellulaires est facilitée par la connaissance de l'exposome auxquelles les organismes sont confrontés. Par exemple, les processus biochimiques d'une cellule microbienne s'opèrent de manière coordonnée et synchronisée avec les variations de facteurs environnementaux. En fait, l'exposome a exercé tout au long de l'évolution des pressions de sélection sur les organismes, si bien que certains changements routiniers sont devenus prédictibles. Ainsi, Baliga estime que les systèmes biologiques ont utilisé ces mécanismes à leur avantage et ont évolué avec des comportements d'anticipation. Les rythmes circadiens, les cycles saisonniers ou encore les comportements migratoires des oiseaux semblent être à l'origine de comportements anticipatoires à différentes échelles temporelles.

Il a été également démontré que l'architecture des réseaux environnementaux est « imprimée » dans la structure des réseaux biologiques, avec pour conséquence chez les bactéries qu'un découplage des changements de conditions environnementales peut réduire le fitness des organismes (Tagkopoulos et al. 2008). Et le succès reproducteur peut être regagné par le biais d'un processus de reconnexion relativement rapidement (< 100 générations), au vu du temps de génération moyen des micro-organismes. Une telle reconnexion suggère qu'un organisme peut migrer d'un environnement suboptimal vers un rapide gain de fitness.

Dans le cadre du programme Oïkosmos, l'étude des processus impliqués dans l'acclimatation des micro-organismes à des variations de configurations et de paramétrages de l'exposome, qui découle du de leur sensing d'un signal prédictif environnemental permet de déduire comment ces phénomènes se sont développés à l'échelle systémique au cours de l'évolution. Une fois décodée, la logique de l'architecture des systèmes biologiques clos permettant aux micro-organismes d'anticiper des changements environnementaux devrait en retour aider à mieux prédire leur comportement dans la boucle.

Un simulateur d'ECA doit permettre la collecte de données omiques durant plusieurs mois, et une maîtrise des échanges et des circulations de flux de matières et de molécules au sein de l'ECA. Il devra être ainsi à même d'effectuer en continu l'analyse chimique et microbiologique de la qualité de l'air et de l'eau, mais aussi des aliments, de matières fécales, afin d'évaluer par exemple la présence de produits métaboliques (éco)toxiques, de perturbateurs endocriniens ou de métaux lourds. Ensemble, les techniques analytiques de la transcriptomiques (biopuces à ADN) et les outils de la protéomique, ainsi que les biomarqueurs émergents et la bioinformatique permettront d'envisager de cartographier les effets de l'exposome à partir d'une goutte de sang ou à partir du prélèvement d'un échantillon d'un compartiment de l'ECA, afin de mesurer les changements de manière dynamique.

Grâce aux approches de biologie systémique, l'origine multifactorielle des perturbations de l'activité biologique de l'ECA pourrait être mieux appréhendée, afin de déterminer quels facteurs génétiques et/ou environnementaux mènent à l'apparition de dérèglements métaboliques. La superposition des méthodes omiques doit être coordonnée pour être à même de les combiner adéquatement et de maximiser leur potentiel pour appréhender les multitudes de réactions métaboliques se déroulant dans un ECA. Avec pour objectif que la plupart des réponses biologiques aux modifications de l'exposome, même mineures, devraient pouvoir être détectées ou confirmées par l'étude simultanée de l'ECA par des technologies omiques.

Pour ces raisons, assurer le pilotage aussi stable et sécurisé que possible d'un ECA pourrait ainsi bel et bien passé à un « spin-in » de l'état de l'art des technologies omiques (voir §4.2.3.1 sur l'approche synergistique du programme Oïkosmos). En retour, ces dernières pourront voir certains aspects de leurs méthodologies affinés et améliorés par leur exploitation sur de longues durées dans un environnement hypermonitored, dans lequel divers systèmes de biomolécules sont surveillés et analysés en parallèle.

Un des enjeux principaux de l'intégration de tous ces outils omiques consistera à pouvoir interpréter ce déluge de données omiques via une méta-analyse comparable à celle faite dans le domaine biomédical pour détecter la signature globale d'une cellule cancéreuse en « agrégeant » et consolidant les données provenant de plusieurs dizaines d'études différentes (Segal et al. 2004; Rhodes 2004; X. Yang et al. 2005; Xu et al. 2007).

La cartographie des effets de l'exposome par l'intégration des outils de la la biologie systémique améliorerait les capacités d'analyse des réponses de l'ECA aussi bien au niveau de ces individus et

organismes, qu'à l'échelle écosystémique, c'est-à-dire au niveau de communautés d'espèces dans leur milieu reconstitué.

À terme, les signatures de certains des profils d'expression génomiques, protéiques ou métaboliques pourraient jouer le rôle des biomarqueurs « multimoléculaires » liés à une condition écosystémique donnée (voir le §8.3.1.2 sur les signatures alimentaires). Le suivi conjoint de données omiques d'organismes humains, végétaux et bactériens pourrait ensuite permettre de les corrélérer, afin de détecter précocement des problèmes pouvant surgir dans l'écosystème.

Puisque l'enjeu fondamental de l'élaboration d'un ECA est la création d'outils de biomonitoring ultra fiables permettant le contrôle en temps réel d'un maximum de composants chimiques et biochimiques, ces technologies de monitoring devraient pouvoir être facilement transposables à des domaines autres que l'aérospatial, on peut aisément imaginer des collaborations avec d'autres groupes de recherches en écologie, en microbiologie, en biologie cellulaire et génétique, etc.

8.2.5 La métabolomique : l'analyse des effets de l'exposome sur les voies métaboliques de l'ECA

Les êtres vivants sont le siège de milliers de réactions biochimiques et métaboliques simultanées et précisément régulées indispensables à leur (sur)vie, de la conception à la mort, en passant par la croissance et la maturité. Chacune de ces réactions est initiée par des stimuli internes (hormonaux, enzymatiques) et/ou externes (conditions environnementales). Les voies métaboliques transforment les molécules de l'organisme, et en particulier les substances ingérées. Un métabolite désigne une substance qui se constitue au cours du métabolisme. Sa métabolisation implique sa transformation ou son utilisation par l'organisme, mais relevons que certains métabolites ont la capacité de se bioaccumuler dans le corps.

La métabolomique se définit comme l'étude systématique des empreintes chimiques laissées par des processus cellulaires spécifiques, de l'alimentation à l'exposition à des contaminants dans l'air. Elle regroupe les techniques d'analyse de l'ensemble des métabolites présents dans un échantillon (cellulaire, tissulaire, urinaire ou sanguin) visant à obtenir un profil détaillé de leur identité, état, activité et localisation (Wahli & Constantin 2011). La métabolomique tient compte de la production des molécules non protéiques et de tous les produits annexes et résiduels à ces transformations. Son étude passe au crible les sous-produits issus des voies métaboliques prenant place sans interruption dans le corps humain.

Le « métabolome » d'un organisme donné est constitué de l'ensemble des métabolites produits par les réactions biochimiques à un instant précis, dans un tissu ou un fluide corporel particulier. Il englobe les molécules exogènes (ingérée, inspirée, absorbée) ou endogènes (synthétisée) et leurs dérivés. Les

« déchets » métaboliques trouvés dans le sang ou l'urine (et qui sont voués à être excrétés) sont bien entendu inclus dans la notion de métabolome, qui comprend également les xénobiotiques, ainsi que les molécules provenant de l'inflammasome, des maladies préexistantes, des stress oxydatifs et du microbiome (la flore microbienne du corps humain discutée au §8.3.3). Une des caractéristiques clés du métabolome est son dynamisme, puisque celui-ci se modifie en permanence. Sa diversité est d'ailleurs bien plus grande que celles des autres systèmes de biomolécules exposées jusqu'ici. Par exemple, sa composition pourrait être radicalement différente pour un même individu, selon un changement de diète ou une variation de la composition de l'air intérieur dans un habitat.

Les technologies métabolomiques sont souvent basées sur des techniques de spectrométrie de masse (Scalbert et al. 2009). Comme le démontre Patti et ses collègues (2012) dans la revue *Nature*, les plus émergentes de ces technologies de spectrométrie de masse permettent l'analyse chimique de milliers de métabolites, qui peuvent être quantifiés à partir de quantité toujours plus faible de matériel biologique, afin d'établir un profil métabolomique globale. Selon eux, les approches non ciblées semblent offrir d'intéressantes perspectives, comme la découverte de nouvelles voies cellulaires ou la révélation des rouages de mécanismes biochimiques encore méconnus, qui permettraient d'approfondir notre compréhension de la biologie cellulaire, mais aussi de la physiologie et de la médecine en général (Patti et al. 2012).

Autre avantage, la métabolomique permet d'envisager de rétablir les diagrammes biochimiques en incluant des informations quantitatives, par des approches en utilisant des techniques de « fluxomique » basées sur des précurseurs marqués avec des isotopes comme le ^{13}C , pour analyser la cinétique d'une activité métabolique (Dang et al. 2009). Concrètement, il est dorénavant possible d'aller au-delà du simple catalogage de molécules, en reconstruisant des voies métaboliques présentant un intérêt thérapeutique grâce aux outils de la métabolomiques (Baker 2011). En complément des études sur les réseaux métaboliques humains, leur potentiel est également immense pour les micro-organismes et les végétaux.

La recherche métabolomique présente un intérêt certain pour l'étude du métabolisme de l'ECA, soit toutes les réactions biochimiques par lesquelles les cellules de ses organismes assurent leur fonction, produisent de l'énergie et se reproduisent. Sur le long terme, un des potentiels intéressants de profils métabolomiques établis successivement réside dans la possibilité de détecter précocement des dérèglements métaboliques causés par l'exposition sur de longue durée à des conditions environnementales particulières de l'habitat clos ou un régime alimentaire spécifique.

Appliquée aux ECA, la recherche métabolomique s'axe de ce fait sur les changements affectant la distribution des métabolites présents dans les compartiments de l'ECA (photobioréacteur, chambre de culture, habitat) et les compartiments internes des organismes (organes, tissus et fluides corporels) (Miller et al. 2019). Cette capacité de suivi de la circulation de systèmes de biomolécules dans un

écosystème simplifié pourrait aboutir à une prédiction des réactions selon les perturbations touchant les organismes de l'ECA (§7.3.3.2.d). Une meilleure connaissance du métabolome, que l'on peut considérer comme l'exposome interne, pourrait ainsi être couplée à bon escient avec la mesure de l'exposome externe (§7.3.3). L'un comme l'autre fait l'objet de fréquentes variations de leur composition et tous deux sont interdépendants (comme l'a mis en avant le §8.2.5).

Pour ces raisons, il semble bien qu'un démonstrateur technologique dédié aux ECA qui exploiterait une approche métabolomique représente un formidable instrument pour l'analyse moléculaire, biochimique et physiologique de l'homme, grâce à une parfaite connaissance des conditions écosystémiques en présence à un instant donné, couplée à une forte interconnexion entre les compartiments.

Ultimement, déployer une recherche omique dans un simulateur d'ECA pourrait être une occasion unique d'établir non seulement les premiers métabolomes à l'échelle d'écosystème entier – des « métamétabolomes » –, mais également des métaprotéomes ou des métatranscriptomes (Baveye 2009; Bergen et al. 2013). Il en découlerait sans aucun doute un approfondissement de notre compréhension de la dynamique d'un ECA et de nouveaux moyens de régulation de son homéostasie (§7.3.4).

Ajoutons que les démarches « méta » seront également abordées dans le chapitre sur le microbiome, sous l'angle du « métagénome » des micro-organismes de la flore intestinale humaine (8.3.3).

8.2.6 La recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (1/2) : de la génomique à la métabolomique

Nul doute que les sciences et technologies omiques faciliteront la production d'informations pertinentes pour la biosurveillance de la santé de l'ECA, utiles à la fois pour le diagnostic, la prévention, la prédiction et le traitement de pathologies qui pourraient toucher ses organismes.

À ce stade, il paraît utile de récapituler succinctement les utilisations et les techniques d'analyse associées aux quatre axes des sciences omiques décrits jusqu'ici :

- Génomique (séquençage) (§6.3.1, §8.2.1) : permet d'obtenir la séquence d'ADN et de repérer les variations génétiques (mutations génétiques et modifications épigénétiques) ;
- Transcriptomique (biopuce à ADN) (§6.3.2, §8.2.2) : permet d'analyser et de comparer les profils d'expression des gènes, suite à l'activation de voies de transduction du signal et de facteurs de transcription ;
- Protéomique (électrophorèse 2D, spectrométrie de masse, puces à protéine) (§6.3.2, §8.2.2) : permet d'identifier la présence, la quantité et la fonctionnalité des protéines ;
- Métabolomique (spectrométrie de masse, résonance magnétique nucléaire, chromatographie) (§6.3.3, §8.2.5) : permet d'identifier les produits intermédiaires du métabolisme, c'est-à-dire les

produits non protéiques issus des réactions enzymatiques.

Un simulateur d'ECA pourrait exploiter abondamment ces quatre approches de biologie systémique. Le programme Oïkosmos offre ainsi la possibilité d'investiguer en profondeur des aspects variés des systèmes biologiques en combinant les sciences et les technologies omiques : de l'analyse de l'ensemble de l'ADN d'un organisme (génomique) à l'étude de l'expression de l'ARN (transcriptomique), jusqu'à l'étude de l'assortiment de protéines exprimées à un instant donné par une cellule (protéomique), ainsi qu'à l'analyse de l'ensemble des métabolites présents à un moment précis (métabolomique).

La biosurveillance de l'ECA permettant d'appréhender la biodiversité moléculaire de l'écosystème, il ne s'agira pas forcément d'effectuer l'analyse exhaustive des systèmes de biomolécules, mais d'identifier en priorité de nouvelles interconnexions dans des voies réactionnelles activées – qu'il s'agisse des voies transcriptomiques, protéomiques ou métabolomiques – chez les êtres vivants de l'ECA, afin de déterminer par exemple quels métabolites sont produits en fonction d'un exposome donné, ou quelles protéines sont exprimées après telle ou telle perturbation.

En résumé, la combinaison des sciences et des technologies omiques au sein d'un simulateur d'ECA pourrait accélérer le développement d'outils intégrés de biologie moléculaire permettant :

- d'appréhender la complexité de la relation entre les organismes de l'ECA : en caractérisant des réseaux biologiques complexes d'interactions macromoléculaires à l'échelle de systèmes de biomolécules ou en étudiant la circulation d'ensembles de molécules à l'échelle d'un ou plusieurs des compartiments de l'ECA ;
- d'étudier les mécanismes biologiques qui gouvernent l'évolution des ECA en bénéficiant d'approches de simulation performantes : tirant le meilleur parti des données récoltées en masse sur la santé des organismes, des informations et des connaissances hétérogènes produites par l'ECA ; décrivant et prédisant le fonctionnement des ECA à partir de la connaissance de leurs composants et de leurs relations associées, en confrontant modélisations et expérimentations ; actualisant et centralisant continuellement des données dispersées issues de sources multiples ; et assurant la reproductibilité des procédures de pilotage de l'écosystème (y compris des contre-mesures).
- d'investiguer les effets de perturbations de l'exposome induites par un changement de paramètres expérimentaux ou par toutes variations volontaires des conditions écosystémiques de l'ECA à l'image : de l'introduction d'un nouveau régime alimentaire (selon les plantes cultivées à une période donnée ou l'apport nutritif spécifique désiré) ; de la prise d'un traitement thérapeutique (médicamenteux, hormonal, etc.) ; du déploiement d'un programme d'exercice physique ;
- d'identifier des biomarqueurs émergents permettant de cartographier bioinformatiquement les

effets de l'exposome à partir d'échantillon (p. ex. goutte de sang) et de mesurer les changements de manière dynamique ;

- de déployer des études de biosécurité en milieu confiné pour le contrôle de la qualité microbiologique de (photo)bioréacteurs par la mise au point de nouvelles stratégies, méthodes et procédures d'évaluation de la santé de micro-organismes de l'ECA ;
- de disposer de systèmes d'alerte précoce (« early warning detectors ») pour l'identification d'instabilités métaboliques et génomiques causées par 1) des toxines bactériennes, 2) des éléments génétiques mobiles ou 3) des souches pathogéniques ;
- d'étudier les phénomènes de transfert horizontal de gène, c'est-à-dire d'éléments génétiques mobiles comme des phages, plasmides, transposons ou îlots génomiques de pathogénicité ;
- d'accélérer l'établissement de diagnostics biomédicaux et d'élucider les mécanismes biologiques qui conduisent au dysfonctionnement de l'ECA (p. ex. lors de l'apparition d'une virulence bactérienne) : 1) en analysant simultanément l'influence de l'exposome sur plusieurs systèmes de biomolécules ; 2) en déterminant les profils omiques associés aux dérèglements génomiques ou métaboliques affectant les différents organismes de l'ECA.

Les thématiques et sujets de recherche incluent encore :

✧ Investigations génomiques : développement, optimisation et application d'approches moléculaires, d'appareillages et/ou technologies de séquençage de dernières générations permettant :

- l'évaluation des modifications génomiques et métaboliques aux différents stimuli de l'ECA (étude des ECA en conditions normales, de stress, etc.) ;
- l'intégration des approches omiques à la sélection génétique de l'équipage : prédiction de l'influence d'une exposition longue durée aux contraintes extrêmes des habitats clos sur les profils génétiques et épigénétiques des candidats ; identification de sous-populations regroupant des génotypes à risques pour certaines maladies qui pourraient se développer dans les ECA.
- l'étude de génomique comparative tout au long des campagnes de simulation/missions, suivi de l'évolution des taux de mutations cellulaires : détermination de la nature, et des facteurs influençant la fréquence des mutations de cellules humaines ou de micro-organismes évoluant en conditions extrêmes ; analyse génomique hôte-pathogène.
- le screening de gènes de virulence (virus, plasmide bactérien, etc.) risquant de produire des toxines (comme la cyanotoxine, une neuro- et hépatotoxine) ;
- la recherche de marqueurs génétiques pour la prédiction de risque de développer des troubles propres aux environnements spatiaux (musculaires, osseux, immunitaires, circadien, etc.) ;
- le développement de systèmes de biomonitoring permettant de quantifier les dommages à l'ADN et aux chromosomes causés par des composés génotoxiques ou carcinogéniques, de

stress oxydatifs ;

- l'établissement de diagnostic génétique rapide : optimisation des procédures d'échantillonnage, de méthodes d'amplification de marqueurs génétiques, protéiques ou métaboliques.

◇ Investigations transcriptomiques (Quintens et al. 2020; Wang et al. 2021) : développement, optimisation et application d'approches et de méthodes moléculaires, d'appareillages et/ou de techniques de dernière génération permettant :

- l'identification de profil d'expression génique ; le suivi de l'évolution de transcriptome ; l'identification de facteurs clés influençant la régulation de la transcription (y compris contrôle épigénétique) ;
- la comparaison des tissus échantillonnés avec des empreintes génétiques connues : tissus sains vs malades, traités vs non-traités, etc.
- l'étude du rôle des ARNm non codant sur les organites cellulaires ;
- l'identification de l'influence de petits ARN non codants bactériens (sRNA) et de circuits et des réseaux de régulations géniques : sur la réponse au stress, sur le quorum sensing, etc.
- les investigations sur les modifications épigénétiques (micro-ARNs et autres régulateurs de l'expression génique) ;
- la prédiction de risques biologiques basés sur l'utilisation de « puces à ADN » de dernière génération : criblage à haut débit pour sonder la fonction des gènes à l'aide de petits ARN interférents (pARNi, siRNA), etc.

◇ Investigations protéomiques (Sachdeva et al. 2018; Ilgrande et al. 2018; Bayon-Vicente 2020) : développement, optimisation et application d'approches et de méthodes moléculaires, d'appareillages et/ou de techniques de dernière génération permettant :

- l'automatisation des outils de la protéomique : séparation des protéines par gel électrophorétique 2D-PAGE, extraction de spot, digestion enzymatique, analyse par spectrométrie de masse, recherche dans les bases de données informatiques, cartographie peptidique, profilage protéomique pour la comparaison des lignées cellulaires, des mutants, des cellules stimulées vs non stimulées, analyse de complexes protéiques (immunoprécipitations), etc. ;
- le développement d'outils d'analyse chimique spécifiques aux ECA : détermination de structure moléculaire, identification des protéines par spectrométrie de masse (MALDI, électrospray, analyses LC-MS, GC-MS, spectroscopie NMR), quantification, détermination de composition élémentaire ;
- en protéomique descriptive : l'identification de protéines à partir d'un protéome donné (selon la

cible biologique, les conditions du milieu, le moment, etc.) ;

- en protéomique quantitative (différentielle) : l'identification des modifications du protéome associées à des changements de conditions ou le suivi dynamique d'une cible biologique définie comme des changements de composition en protéines de l'urine (Pastushkova et al. 2012) ;
- le développement de « puces à protéines » destinées au diagnostic de biomarqueurs, basées sur la capture de protéines d'intérêt d'un échantillon par des anticorps : amélioration des techniques de collecte d'échantillon, de la résolution de techniques de détection ; détermination d'activités enzymatiques (kinases), études liaison de métaux ; détection et quantification de protéines dans des échantillons cliniques (biofluides et tissus) ; interactions protéine-protéine ou récepteur-ligand, etc.
- l'établissement de métamétabolomes à l'échelle de communautés d'organismes ou d'écosystèmes entiers.

◇ Investigations métabolomiques (Miller et al. 2019) : développement, optimisation et application d'approches et de méthodes moléculaires, d'appareillages et/ou de techniques de dernière génération permettant :

- la détermination de profils métabolomiques (et nutriginomiques) individuels humains à partir d'échantillon urinaire ou sanguin ;
- la détection d'instabilité métabolomique au sein de l'ECA, basée sur le dépistage de produits métaboliques ou l'extraction de métabolites à partir d'échantillons tissulaires ;
- l'étude de la distribution des métabolites présents dans les compartiments de l'ECA (photobioréacteur, chambre de culture, habitat), et dans le milieu interne de ses organismes (organes, tissus et fluides corporels) ;
- le développement de puces biologiques pour monitorer un système métabolique bactérien, végétal ou humain des ECA : screening de différents métabolites des échantillons ; détermination de profils métabolomiques ; identification de l'expression d'enzymes de voie biochimique ou métabolique données (voie de dégradation ou de synthèse) ; observation de l'accumulation ou de la disparition des métabolites associés ;
- l'établissement de métabolome des processus : stœchiométrie et dynamique du métabolisme ; identification de nouveaux métabolites ; diagnostic enzymatique de procédés biologiques ;
- l'établissement de métamétabolomes à l'échelle de communautés d'organismes ou d'écosystèmes entiers.

◇ Transfert horizontal de gène, éléments génétiques mobiles et îlots génomiques de pathogénicité :

- étude des conditions écosystémiques pouvant influencer le transfert horizontal de gène et induire des pathogénicités ; étude de l'évolution des bactéries dans l'acquisition de traits pathogéniques et/ou de résistance ;
- évaluation des effets de perturbations (y compris celles propres au spatial : microgravité, rayonnement, etc.) sur la régulation d'îlots génomiques de pathogénicité et détection des changements de conditions écosystémiques activant ces voies moléculaires ;
- détection d'instabilités génomiques et/ou métabolomiques causées par un transfert de gène horizontal (plasmide de résistance) ;
- développement de méthodologies et d'outils contrôler la diversité génétique bactérienne et de détection précoce des conditions pouvant l'induction de prophages depuis les génomes de bactéries (activation de la réplication virale via un cycle lysogénique) ;
- identification des voies de signalisation moléculaire impliquées et des fonctions qu'ils régulent au sein des ECA : virulence, pouvoir pathogène, transfert conjugatif de plasmides, production d'antibiotiques, apparition de la compétence par transformation, mise en place de flagelles, etc. ;
- catalogage et benchmarking des éléments génétiques mobiles de l'ECA avec les bases de données dédiées existantes : plasmides, transposons, phages, etc. (Leplae 2004) ;
- établissement de contre-mesures pour limiter les mécanismes de transduction, de transformation et de conjugaison.

✧ Investigations des effets de l'exposome sur les organismes et de leur réponse au stress :

- détection de signature (biomarqueurs multimoléculaires) liés à une condition écosystémique donnée dans des échantillons (cellulaire, tissulaire ou sanguin) suite à une exposition particulière : détermination de profils d'expression génomiques, protéiques ou métaboliques ;
- évaluation des effets : sur le comportement cellulaire (ex : production de biofilm), sur la physiologie cellulaire (ex : perméabilité de la membrane plasmique, de l'activité enzymatique), sur les voies moléculaires intracellulaire (ex : dynamique de l'ADN (mutation), de l'ARN et des protéines (activation des gènes et des fonctions protéiques)) ;
- interprétation des effets et et établissement de corrélations entre les profils moléculaires (sanguin) et des mesures physiologiques (taux d'hormones de stress) ;
- étude de toxicité (toxines bactériennes, de micropolluants, de contaminants) : évaluation des effets sur les individus : mécanismes moléculaires et cellulaires de la toxicité dans les cellules d'organismes (vertébrés, plantes, micro-organismes) ; perturbation de voies moléculaires, biochimiques ou physiologiques ; perturbation des fonctions de compartiments de l'ECA (nitrification pour le compartiment III de MELiSSA) ; biodisponibilité des contaminants ; évaluation des effets sur les populations : variation du nombre d'individus, apparition de

résistances (biocides, antibiotiques, etc.).

Les domaines d'applications des sciences omiques appliquées aux ECA incluent également le contrôle de la qualité microbiologique (bioréacteurs de l'ECA, résistance aux radiations lors de vols spatiaux), l'ingénierie métabolique visant à optimiser la production microbienne de produits chimiques, voire l'identification de cibles pour des médicaments.

Les sciences et technologies omiques peuvent être utilisées pour diverses autres applications qui positionnent le simulateur d'ECA comme un instrument d'évaluation des effets de l'exposome pour :

- l'optimisation de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs (§7.3.2) ;
- le déploiement de tests écotoxicologiques permettant de détecter précocement l'influence de l'exposome sur les micro-organismes (§7.3.3.2) ;
- le contrôle qualité de la composition biochimique et nutritionnelle et le contrôle qualité chimique et microbien de procédés agroalimentaires de l'ECA (§8.3.1.2) ;
- le suivi des effets de l'alimentation sur le corps humain, d'une part sur le génome et le métabolisme (voir §8.3.2 sur l'optimisation de la nourriture grâce au sciences omiques comme la nutriginomique) et d'autre part sur la flore microbienne (voir le §8.3.3 sur la microbiomique) ;
- le contrôle de la qualité (microbiologique) de l'air intérieur et des surfaces de l'habitat clos (§10.5).

8.2.7 La physiologie de l'exercice : une approche non omique pour le maintien de l'homme en bonne santé

Si les technologies métabolomiques semblent des plus pertinentes pour l'étude des voies métaboliques de l'ECA, le programme Oikosmos offre également d'intéressantes opportunités de recherche en physiologie de l'exercice pour le maintien de l'homme en bonne santé fondé sur une approche non omique, en particulier pour étudier les relations entre l'activité physique et : l'entraînement sportif et la performance corporelle (médecine du sport, sciences du mouvement, etc.)^{261,262} ; le vieillissement (gérontologie) : maintien des aptitudes physiques (contrôle moteur), réentraînement et analyse biomécanique et énergétique de la marche²⁶³, etc. ; et les environnements extrêmes (médecine de

²⁶¹ Voir la section « Activité physique et santé » de la Haute école fédérale de sport de Macolin (HEFSM) : www.baspo.admin.ch/internet/baspo/fr/home/ehsm/forschung/bewegung.html

²⁶² Voir notamment les recherches menées par l'Institut des sciences du sport de l'UNIL : www.unil.ch/issul/page68306.html

²⁶³ *ibid.*

l'altitude) : étude des mécanismes de limitation de l'effort en endurance, influence des influx sensoriels propres aux conditions extrêmes sur les systèmes cardiorespiratoires, effet sur les coordinations motrices et neurosciences.

Concrètement, il s'agira par exemple d'évaluer les effets de facteurs environnementaux de l'habitat clos sur la performance sportive sur des paramètres comme la respiration, la transpiration, le stress, la voix, la concentration, la perception visuelle, etc. (voir également le §9.4.3.4 sur la psychophysiologie de l'émotion et la performance en conditions extrêmes).

La recherche en physiologie de l'exercice favorisant le maintien des aptitudes physiques des personnes vivant en habitat clos peut se fonder sur :

- le monitoring de paramètres tels que : la température, le poids du corps, la fonction cardiorespiratoire, la composition du sang, l'assimilation des protéines, les échanges lipidiques, les réactions visuelles et motrices, la microflore humaine, etc. ;
- la mesure en temps réel de biofeedback (mesure de rythme cardiaque, respiration, tension musculaire) et de neurofeedback (mesure d'ondes alpha ou bêta par électro-encéphalographie) ;
- les investigations de physiologie intégrée : évaluation de la dépense énergétique, suivi du métabolisme énergétique global et du métabolisme mitochondrial au niveau cellulaire, télémétrie de la température corporelle et de l'activité locomotrice, analyse non invasive de la composition corporelle, incluant le suivi de l'alimentation et de la boisson, de la production de chaleur, de l'oxydation de glucides / lipides, détection des variations de l'absorption et du stockage de l'énergie suite à l'apport alimentaire ;
- le développement d'équipements de détection (sensing métabolique) : d'anti-inflammatoires (utilisés pour leur effet antalgique) de bêtabloquants (molécule hypotensive pouvant réduire les tremblements), voire d'amphétamines (psychotropes pouvant améliorer l'endurance), ainsi que d'hormones protéiques telles que des facteurs de transcriptions des gènes de l'érythropoïétine (EPO, facteurs de croissance des lignées hématopoïétiques), la follistatine et de la myostatine (respectivement des hormones stimulant et inhibant la croissance des muscles), tout comme les dérivés de l'insuline et de la testostérone (anabolisants), de l'hormone de croissance (croissance musculaire), de bronchodilatateurs (meilleure absorption de l'oxygène, en cas de déséquilibre dans le bilan gazeux à l'intérieur de la navette). Domaines d'application : lutte antidopage (y compris dopage génétique²⁶⁴), détection de marqueurs de maladies (y compris de biomarqueurs génétiques) ;
- les investigations cliniques cardiovasculaires et cardiorespiratoires : mesure du débit sanguin cérébral, de flux cutané, de pression veineuse centrale, de rigidité artérielle, d'échanges gazeux ;

²⁶⁴ « Avec le Repoxygen, premier exemple de dopage génétique », Le Figaro, 2009 : www.lefigaro.fr/sport/2009/08/25/02001-20090825ARTFIG00015-avec-le-repoxygen-premier-exemple-de-dopage-genetique-.php

évaluation de la dynamique des réponses métaboliques à l'exercice ; 3) évaluation de la variabilité des réponses cardiovasculaires pendant et après l'exercice ;

- les investigations sur la physiologie rénale : homéostasie des solutions du corps (électrolytes) ;
- les investigations sur la physiologie musculaire et osseuse : développement d'équipements et de protocoles médicaux pour l'amélioration de moyens de diagnostic et la prévention contre l'ostéoporose et l'atrophie musculaire chez les personnes âgées (Fitts et al. 2013) ;
- les investigations sur le système immunologique : détermination des facteurs influençant l'évolution des fonctions immunitaires en conditions extrêmes, mesure de l'impact du stress mental sur le fonctionnement du système immunitaire ;
- le développement de programmes d'entraînement physique personnalisés et des contre-mesures visant à : stimuler des compétences sensorielles et motrices faiblement exploitées lors de certaines phases de la mission, lutter contre le déconditionnement physique (pertes musculaires et osseuses causées par l'impesanteur) via l'utilisation de plate-forme vibrante (voir études Mars500 ou « bed-rest » de l'ESA).

8.2.8 La biologie synthétique : vers la création de fonctions métaboliques sur mesure pour les ECA

Dans le cadre des ECA, l'amélioration du rendement du recyclage implique bien entendu l'optimisation des équipements eux-mêmes : (photo)bioréacteurs (§7.3.2), chambres de cultures (§8.3.1.2), etc. Mais les rendements pourraient également progresser grâce à l'utilisation de la biologie synthétique – et en particulier des outils du génie génétique et de l'ingénierie métabolique –, afin de créer (« synthétiser ») de nouvelles fonctions biologiques, intégrables aussi bien aux micro-organismes, qu'aux plantes supérieures de l'ECA. En retour, l'ensemble de l'écosystème pourrait bénéficier de fonctions métaboliques améliorées par ces modifications génétiques.

✧ *Les modifications génétiques de micro-organismes*

Tout d'abord, les outils de la biologie synthétique permettent de modifier génétiquement des souches de micro-organismes comme la spiruline, et de les transformer en véritables « micro-usines » cellulaires de bioraffinage pour le traitement des effluents urbains ou celui du gaz carbonique issu de processus industriels. Les micro-organismes génétiquement modifiés peuvent aussi permettre la synthèse de polymères avancés à partir des « building blocks » fournis par d'autres compartiments²⁶⁵. De la même

²⁶⁵ Des firmes comme la start-up américaine OPX biotechnologies cherchent à substituer les synthèses chimiques par la biosynthèse de produits biosourcés à partir de micro-organismes génétiquement modifiés. La société développe des souches d'*Escherichia coli* capables de transformer du sucre en acide acrylique, pour la fabrication de peintures et d'adhésifs, avec une

manière, la biologie synthétique peut également offrir des outils permettant d'optimiser la capacité de micro-organismes à produire des biocarburants dans le contexte des ECA.

Des capacités de bioremédiation²⁶⁶ pourraient s'avérer intéressantes pour retirer des micropolluants présents dans l'ECA, par exemple dans les flux d'eaux grises. Toutefois, faute de temps ou de moyens, il ne sera peut-être pas possible d'étudier la faisabilité de l'intégration d'une souche naturellement dotée de capacités de bioremédiation, qu'on a certes identifiées, mais dont on doit vérifier la compatibilité avec d'autres espèces de l'ECA. Dès lors, il pourrait s'avérer judicieux de transférer artificiellement les fonctions métaboliques de ce micro-organisme à une autre, déjà présent dans la boucle ou dont on a pu par le passé tester le comportement dans l'ECA. Des techniques récentes de biologie synthétique pourraient être utilisées pour intégrer une telle fonctionnalité de bioremédiation, en particulier si elle est basée sur l'action ou plusieurs enzymes d'une voie métabolique permettent par exemple de concentrer, dégrader, catalyser ou séquestrer des substances toxiques. Au sein d'un simulateur d'ECA, ces activités de dépollution pourront ensuite être monitorées par des méthodes d'analyses chimiques (comme des chromatographies en phase liquide de type HPLC), afin de suivre la disparition effective des différents contaminants étudiés.

Autre exemple, on pourrait imaginer intégrer à l'ECA des fonctions issues de micro-organismes « extrémophiles²⁶⁷ » et donnant la capacité de supporter des conditions extrêmes ou à synthétiser des biocomposés extrêmes, par une modification génétique de la souche receveuse dont on maîtrise bien le comportement dans la boucle de l'ECA.

Si la faisabilité et le succès de telles manipulations du vivant ne sont pas encore possibles ou garantis aujourd'hui, on peut raisonnablement les envisager à moyen long terme, au vu de l'essor de la biologie moléculaire ces quarante dernières années comme on l'a vu §6.3.

L'approche de la biologie synthétique et l'usage des outils associés de la biologie cellulaire et moléculaire permettent d'envisager la mise au point de nouvelles configurations génétiques et voies métaboliques. À titre d'illustrations, les thématiques et sujets de recherche associés incluent :

- la modification génétique de souches de micro-organismes (comme la spiruline, les clostridies, etc.) permettant : d'optimiser leur performance en culture (§7.3.2) ; de les transformer en micro-

réduction de 75% des émissions de CO₂ par rapport à la production traditionnelle à base de pétrole. Les productions envisagées sont d'envergure avec des dizaine de millions de litres par an.

Site web de la société OPB biotechnologies : www.opxbio.com/about-us/awards/

²⁶⁶ La bioremédiation est l'ensemble des processus qui utilise des micro-organismes, des champignons, des plantes ou leurs enzymes pour dépolluer des environnements, des milieux ou des flux dont la condition originelle est altérée par des contaminants

²⁶⁷ De multiples espèces de micro-organismes peuplent des lieux terrestres soumis à des conditions drastiques après s'être adaptées à des concentrations élevées en composés toxiques ou en métaux lourds, de salinité (halophiles), de température (hyperthermophile), de pression (barophiles) ou encore de pH (acidophile), de gaz, de potentiel rédox, etc.

usines cellulaires capables de valoriser les flux métaboliques des ECA, par exemple en produisant des plastiques à partir de déchets organiques humains (Chen et al. 2018); s'il s'agit d'espèces comestibles, d'augmenter la teneur en molécules d'intérêt pour améliorer leur valeur nutritive (§8.3.2.3) ;

- l'identification et la sélection d'un plus large choix de (cyano)bactéries dotées de propriétés nouvelles ou améliorées et capables : de nouvelles biotransformations : production d'enzymes de dégradation de la lignine, de cellulase, etc. ; de biodégradation ou recyclage de micropolluants ou de contaminants chimiques ; de production de biocarburants (hydrogène, éthanol, etc.) (§7.4.4) ; de rendement photosynthétique supérieur ;
- la conception et le test de nouvelles configurations génétiques de micro-organismes, en remplacement ou en addition de compartiments existants, dotés de fonctions de bioremédiation ou de fonctions enzymatiques issues d'extrémophiles (« extrêmzyme » permettant la synthèse de biocomposés extrêmes, améliorant la biodégradabilité du matériel fibreux ou résistant à des conditions extrêmes) ;
- le développement et le test de procédures de biosécurité adéquates, visant par exemple à élaborer et mettre en œuvre des stratégies de « confinement trophique » en rendant un micro-organisme dépendant pour sa survie de la présence d'un élément nutritif rare ou artificiel dans la boucle de l'ECA.
- domaines d'applications : bioraffinage de flux de matières (effluents urbains, ou du gaz carbonique issu de processus industriels, etc.), bioremédiations (assainissement des eaux usées) et industrialisation de procédés biochimiques moins polluants et moins consommateurs d'énergie (voir §7.4.3), production à grande échelle de molécules d'intérêts dans les domaines du cosmétique, de l'industrie plastique, papetière ou pharmaceutique, etc.

✧ *Les modifications génétiques de plantes*

En 2012, le rapport final du Programme national de recherche (PNR)²⁶⁸ sur le Génie génétique « vert » en Suisse a été publié. Intitulé « Utilité et risques de la dissémination des plantes génétiquement modifiées », ce PNR « n'a mis en évidence aucun risque majeur avéré lié au génie génétique vert, que ce soit pour la santé ou pour l'environnement »²⁶⁹. Le bénéfice économique de cette biotechnologie présente toujours une forte marge de progression. Le rapport va jusqu'à considérer les plantes génétiquement modifiées comme une véritable opportunité. Selon ses auteurs, « [l]es méthodes de production actuellement utilisées dans l'agriculture suisse ne permettent pas d'atteindre les objectifs de

²⁶⁸ Site web du PNR 59 : www.nfp59.ch/f_index.cfm

²⁶⁹ Résultats détaillés du PNR 59 : www.nfp59.ch/f_resultate.cfm?kat=32

protection de l'environnement qui lui ont été assignés. Parallèlement, l'agriculture est tenue d'augmenter sa productivité en abaissant les coûts de production. Elle ne peut affronter ce double défi avec succès que si de nouvelles technologies, y compris le génie génétique vert, ne sont pas exclues d'emblée »²⁷⁰. Un des intérêts réside également dans l'introduction de nouvelles variétés combinant des caractéristiques de résistance aux herbicides et aux maladies²⁷¹.

Dans un tel contexte, des domaines de recherche comme l'agriculture moléculaire se sont développés. Cette dernière vise à mettre au point des biotechnologies permettant la production de protéines recombinantes par des végétaux. Également nommée « biopharming », « molecular pharming », ou encore « molecular farming », cette discipline émergente englobe la production de protéines recombinantes aux propriétés pharmaceutiques, fabriquées par des végétaux transgéniques, aussi bien des plantes que des (micro-)algues (Faye & Gomord 2009). À la fin des années nonante, elle est devenue une alternative crédible pour la production de protéines thérapeutiques. L'agriculture moléculaire a été popularisée avec le tabac producteur d'hémoglobine humaine ou par la biosynthèse de bêta-carotène par une espèce de riz, et utilisée pour produire des anticorps, des vaccins comestibles, des enzymes industrielles, ou encore des hormones (hormone de croissance, de l'insuline), grâce aux capacités de biosynthèse des chloroplastes (Rainer Fischer 2004). Les méthodes et les techniques de génie génétique et de biologie moléculaire associées présentent un intérêt croissant pour les entreprises actives dans les domaines de la biotechnologie, de la pharmacie et de l'industrie cosmétique (molécules aux propriétés organoleptiques) présentant des débouchés dans la production de molécules d'intérêt.

Les synergies de recherche liées à l'intégration de bioprocédés d'agriculture moléculaire en système clos pourraient s'avérer pertinentes pour les ECA, en particulier pour une future base martienne. Dans une telle agriculture « recombinante », l'objectif n'est pas de boucler les flux de matières, mais plutôt de produire des molécules à haute valeur ajoutée. De telles voies de biosynthèse de produits biosourcés par les microalgues ou des végétaux recombinants pourraient être développées, et créer de nouvelles fonctions métaboliques de l'ECA, complémentaires à celles de recyclage hautement efficient.

En parallèle, la biologie synthétique présente un intérêt pour le développement de nouvelles fonctionnalités et procédés de phytoremédiation. La phytoextraction permet d'importer les contaminants (comme des micropolluants ou des métaux lourds) par les racines, la plante se chargeant ensuite de les acheminer vers la partie récoltable par translocation. Après récolte un traitement microbien, thermique ou chimique est possible afin de les récupérer. Par exemple, les métalloytes sont des plantes ayant la capacité d'accumuler des métaux et qui sont utilisés pour dépolluer des sols, des sédiments ou des

²⁷⁰ Citation des auteurs du PNR 59 dans l'article d'Étienne Dubuis, « La science ouvre la voie à l'utilisation des OGM », paru dans Le Temps du 29.08.2012 : www.letemps.ch/Page/Uuid/aae748a8-f148-11e1-b2db-b178ffb6cd3f%7C1#.UJtE7TA4ZE

²⁷¹ Voir communiqué de presse du 28.08.2012 :

www.nfp59.ch/files/news/133_MM_0828_Abschluss_NFP59_f.pdf

effluents variés. Elles pourraient en outre être intégrées à des fermes verticales pour le traitement des effluents urbains (§10.3).

8.3 La nutrition : de la production de nourriture aux approches nutriginomique et microbiomique

Dans la perspective d'Oïkosmos, la notion de nutrition va au-delà de la simple action d'alimenter l'équipage de l'ECA, et est approchée sous trois axes :

- les systèmes de production, de transformation et de préparation de la nourriture : de la culture à l'assiette (§8.3.1) ;
- la nutriginomique : les sciences omiques pour l'optimisation de nutrition (§8.3.2) ;
- la microbiomique : l'analyse de l'influence de la microflore commensale sur la santé des organismes (§8.3.3).

8.3.1 Les systèmes de production, de transformation et de préparation de la nourriture : de la culture à l'assiette

Un enjeu important de l'exploitation d'un ECA réside dans l'optimisation des systèmes de production, de transformation et de préparation de la nourriture nécessaire au ravitaillement de l'équipage. Dès lors, une approche globale semble indispensable pour répondre aux aspects variés de la conversion de plantes en plats à consommer, en particulier au vu de leurs perspectives parfois contradictoires :

- le jardinier ambitionne des conditions de cultures optimisant la croissance de chaque plante ;
- l'ingénieur aspire au design du système de production de nourriture dotée d'un minimum de contraintes, et priorise les espèces les plus robustes possibles et consommables dans leurs intégralités ;
- l'écologue industriel envisage un système de production alimentaire efficient énergétiquement et produisant des déchets organiques facilement valorisables matériellement ;
- le cuisinier a quant à lui envie d'élaborer des recettes simples pour les repas à préparer, que ce soit en termes de choix des condiments et des équipements, de stockage des aliments, d'énergie et de temps à disposition pour la préparation ;
- le médecin désire une qualité nutritionnelle et diététique irréprochable, et sans risque pour la santé ;
- l'astronaute souhaite bénéficier d'une nourriture variée, avec la meilleure qualité gustative possible.

Ces contraintes impliquent la mise au point de systèmes de production de nourriture intégrés, combinant adéquatement productivité de la biomasse, efficacité d'utilisation des ressources et adaptation à l'environnement (Kliss et al. 2000). Le simulateur d'ECA doit incorporer les différentes étapes de « la

culture à l'assiette » puis de « l'assiette à la culture », en fermant la boucle de la production de nourriture grâce à la valorisation des déchets organiques humains et des parties non comestibles des plantes (Trifonov et al. 2019). Les phases de ce cycle sont détaillées dans les sections suivantes et incluent :

- la caractérisation et la sélection des végétaux (§8.3.1.1) ;
- la culture des végétaux (§8.3.1.2) ;
- le contrôle qualité des procédés et produits agroalimentaires (§8.3.1.3) ;
- la préparation finale de la nourriture (§8.3.1.4).

8.3.1.1 La caractérisation et la sélection des végétaux

Premièrement, il est nécessaire de panacher les espèces végétales comestibles d'un ECA pour répondre aux besoins nutritionnels tout en optimisant les rendements. Les cultures avec des indices de récolte intéressants s'obtiennent typiquement avec des espèces à feuilles où l'entier de la tige est comestible comme l'épinard ou la laitue (El-Nakhel et al. 2019). Cependant, ces espèces ne répondent pas aux besoins nutritionnels humains au niveau de leur teneur en glucides, alors que les plantes à tubercules et à racine sont de bonnes sources de glucides et ont de bons indices de récolte (Molders et al. 2012). Les plantes produisant de l'huile sont plus denses énergétiquement, mais ont un moins bon taux de récolte (Salisbury & Clark 1995). De plus, si la composition biochimique et plus récemment le génome de certains produits agricoles ont été largement étudiés, il existe de nombreux fruits et légumes où ce travail n'a jamais été fait alors qu'ils présentent a priori un potentiel intéressant, par exemple en termes d'arômes ou de teneur en vitamines, polyphénols, oméga-3, antioxydants, etc.

Dans un premier temps, une caractérisation approfondie des souches, des cultivars, et des espèces végétales (blé, soja, etc.) s'avère nécessaire, pour déterminer leur physiologie, efficacité et robustesse en ECA. Il a été montré que les caractéristiques clés à prendre en compte pour la sélection des plantes (L. Qin et al. 2008) sont la masse fraîche comestible (g/m^2) ; la période de croissance (j) ; la productivité de la masse fraîche comestible (g/plante) ; la hauteur de la plante, longueur de la tige (cm) ; le contenu hydrique (%) ; le contenu en β -carotène ($\text{mg}/100 \text{ g}$) ; la fibre brute (%) ; le contenu en acides aminés et en acides gras essentiels.

Concrètement, les critères de sélection peuvent inclure : la composition de la solution nutritive, la taille des graines, la taille de la plante mature et la disponibilité du cultivar ; les conditions de culture : besoins matériels, temps de maintenance, conditions de récolte ; les caractéristiques des phases de développements de la plante : temps de génération, vernalisation, dormance, période de croissance, défoliation, etc. ; l'intérêt nutritionnel : rendements de production ; ratio parties comestibles / non comestible, qualité nutritionnelle et sensorielle, contenu énergétique pour 100 g, densité calorique (lipidique vs glucidique vs protéique), ratio de matériel fibreux, contenus en acides gras, en acides

aminés essentiels, en protéines, en amidon, en gluten, teneur en vitamines et oligo-éléments, en métabolites secondaires d'intérêt, en métaux lourds, quantité de matière sèche totale, poids secs des différents organes végétaux ; la capacité d'adaptation à des environnements inhabituellement chauds, humides, à la présence de biocides, pesticides, etc. ; la capacité de résistance aux bioagresseurs et aux pathogènes : au niveau de la tige (champignons, bactéries, virus) ou de la racine : moisissure, champignons.

Au niveau des microalgues, l'identification de souches pertinentes – à l'image de la spiruline (Morist et al. 2001) –, peut comporter des intérêts variés, que ce soit en termes²⁷² : d'efficacité : 1 g de spiruline quotidien suffit à améliorer le développement physique et la performance cognitive ; d'économie en eau pour les cultures : avec des besoins jusqu'à dix fois inférieurs à ceux d'une culture végétale standard à productivité de biomasse équivalente ; de modalités de stockage : sur de longues périodes, sans perte de qualité ; d'intérêt nutritionnel : facilement assimilable (mais sans cuisson) ; de réservoir de molécules actives biologiquement (voir le §8.3.2.3 sur les aliments fonctionnels) ; et des applications terrestres à grande échelle possibles, en l'occurrence via des cultures à l'air libre caractérisées par : une capacité de fixer le carbone ; un prix bon marché ; une simplicité d'utilisation : pas de nécessité de sol fertile. Pour une revue des applications spatiales des cyanobactéries, voir Verseux et al. (Verseux et al. 2016).

8.3.1.2 La culture des végétaux

Ce chapitre porte sur la phase de culture une fois les végétaux sélectionnés, et introduit initialement l'agriculture artificielle et les technologies hydroponiques permettant d'automatiser les cultures et d'améliorer les rendements agricoles. Il aborde ensuite la physiologie végétale en ECA, puis les stratégies de gestion horticole en habitat clos.

Jusqu'à récemment, les termes « agriculture » et « artificiel » semblaient a priori être antinomiques. Pourtant cet oxymore n'a plus lieu d'être aujourd'hui, puisqu'une multitude de produits alimentaires sont cultivés sans aucune interaction avec le sol, élément jusque-là fondamental de l'agriculture. La technologie la plus répandue de nos jours en agriculture artificielle est la culture hydroponique ou hors-sol. Ce mode de culture consiste à faire croître des plantes sous serres, dans un substrat inerte (comme de la laine de roche ou de coco) alimenté par un liquide nutritif ou par un aérosol contenant tout ce dont la plante a besoin pour se développer (phosphore, azote, etc.). Actuellement, la technologie hydroponique est principalement utilisée pour cultiver des légumes tels que des tomates, poivrons, laitues et endives dont la quasi-totalité des variétés commercialisées s'est à présent adaptée à la culture

²⁷² En Suisse, Antenna Technologies, Biorigin SA, Fasteris, et le groupe de recherche Plantes et pathogènes de la HES HEPIA ont développé un programme de R&D en 2010, afin de développer de nouvelles utilisations pharmaceutiques et thérapeutiques des algues.

hors-sol.

Alors que l'agriculture conventionnelle devra s'adapter au renchérissement annoncé de l'énergie et des intrants issus de la pétrochimie, aux nouvelles législations agricoles, environnementales, et économiques, ainsi qu'à la pression exercée sur les terres agricoles par l'urbanisation, l'agriculture artificielle offre plusieurs avantages. Premièrement, elle permet de maîtriser entièrement le milieu de croissance des plantes, de s'affranchir des contraintes climatiques aléatoires et aussi de limiter le recours aux produits phytosanitaires puisque les cultures sont moins exposées aux attaques des diverses maladies. Deuxièmement, la technique goutte à goutte permet de réduire la consommation d'eau et d'engrais, l'eau circulant la plupart du temps en circuit fermé dans ces installations. Cette meilleure gestion de l'eau optimise la croissance de la plante et évite que les excédants d'engrais ne se diffusent dans l'environnement. Toutefois, ce mode de culture présente un certain nombre d'inconvénients. Tout d'abord, la technologie hydroponique requiert des investissements initiaux conséquents dont la période d'amortissement varie. Ensuite, les besoins nutritifs des plantes varient en fonction de leurs stades de maturité et il faut donc être en mesure d'adapter les apports nutritionnels en conséquence. Finalement, la culture sous serres hors-sol est gourmande en énergie. Par exemple, le chauffage des serres dans des pays tempérés comme la Suisse représente souvent près d'un quart des coûts de production (Agristat 2016). Les enjeux de raréfaction des ressources, de dégradations environnementales et la forte croissance urbaine ont également favorisé l'émergence et le développement récent du courant de l'agriculture urbaine. Un des atouts de l'agriculture artificielle est sa capacité à s'implanter où que se soit puisqu'elle ne dépend ni de la disponibilité ni de la qualité du sol. Cet avantage a donné naissance à plusieurs projets d'agriculture urbaine permettant de produire de la nourriture *en* milieu urbain, *pour* le milieu urbain²⁷³.

En Suisse, la start-up CombaGroup²⁷⁴, développe des robots qui produisent des salades toute l'année, via une production maraîchère entièrement automatisée basée sur l'aéroponie. Concrètement, la culture aéroponique consiste ici à planter la graine de salade dans un cube de mousse servant de support. Durant

²⁷³ Dans les métropoles comme New York, des projets comme la Science Barge ont vu le jour, avec un objectif initialement pédagogique : démontrer concrètement qu'il est possible de produire en plein cœur de la ville de la nourriture saine sans aucune émission de CO₂, ni consommation de pesticides, le tout en récupérant les eaux de pluie et en consommant un espace très réduit. Les principales énergies renouvelables telles que l'éolien et le photovoltaïque sont utilisés pour produire, en toutes saisons, des tomates, des concombres et de la salade hors-sol. Description du projet Science Barge : <http://nysunworks.org/thesciencebarge>
Des sociétés, essentiellement aux États-Unis, ont développé des solutions pour exploiter les surfaces des toitures en y cultivant des légumes sous serres hors-sol. Cityscape Farms propose par exemple de louer aux propriétaires d'immeubles tout ou partie de leur toit pour implanter des serres hors-sol, basée sur la culture en aquaponie. Cette technologie combine la production hydroponique de légumes avec l'aquaculture (élevage de poissons). L'intérêt de ce système repose sur l'équilibre de son cycle nutritif, les déjections des poissons jouant le rôle d'engrais. L'utilisation du toit d'un bâtiment permet au propriétaire de rentabiliser une surface qui n'est généralement pas exploitée. De plus, la présence d'une telle structure sur le toit joue le rôle d'isolant thermique et permet de valoriser des flux de chaleur excédentaires du bâtiment et par là même, de réduire considérablement la consommation énergétique de la serre. La serre est aussi conçue pour récupérer les eaux pluviales qui seront utilisées pour l'irrigation des cultures. Enfin, la serre offre une bonne protection du toit contre les intempéries ce qui prolonge sa durée de vie. Site web de la société Cityscape Farms : www.cityscapefarms.com

²⁷⁴ Site web de CombaGroup : www.combagroup.com

la croissance, les racines traversent la mousse de ces blocs de substrat et se retrouvent à l'air libre. Il est ainsi possible de pulvériser directement la solution nutritive (par brumisation) sur les racines en utilisant uniquement les quantités strictement nécessaires d'eau et de sels minéraux. Les diverses variétés de salade proposées (laitues, chicorée, feuille de chêne, etc.) se veulent locales et proches du consommateur, alors que la production optimise les cultures, puisque ne nécessitant aucun pesticide, et économise 90% d'eau par rapport aux cultures irriguées en plein champ, des innovations rendant le concept économiquement viable, selon ces créateurs.

De manière intéressante, le système automatisé d'écartement des plants permet de densifier les cultures par un transfert robotisé. Au fur et à mesure du développement, les plantons sont ainsi espacés à plusieurs reprises (sept fois au cours de la croissance). L'espace fourni aux salades est toujours plus important et est ainsi optimisé tout au long de leur croissance, et prend le moins de place possible. La culture des salades est opérée sous serres chauffées et éclairées par des LED à des longueurs d'onde maximisant les rendements photosynthétiques, garantissant des coûts de production optimisés, et un prix relativement stable de la salade qui n'est pas soumis aux aléas de la météo. Cette technologie est qu'elle permet la réduction des pertes de biomasse à toutes les étapes de production, de transformation (ensachage, sélection de feuilles, lavage de la terre et des pesticides) et lors de la distribution (invidus), qui représentent parfois jusqu'à 50% du produit final arrivant à l'assiette du consommateur. Au final, ce système de production permet de multiplier les cycles à l'année (jusqu'à 10 fois par an au lieu de 2 habituellement). CombaGroup revendique une productivité par surface augmentée de 35 fois et sa technologie entre en phase d'industrialisation²⁷⁵. À terme, de telles installations robotisées pourraient être intégrées directement au sein de grandes sociétés d'ensachage et d'autres filières de telles cultures hors-sol sont envisagées, par exemple pour des pommes de terre, des fraises ou des herbes médicinales.

Les ECA rendent possible l'étude de la dynamique des plantes évoluant dans des environnements changeants (Monje et al. 2003). Oïkosmos permet d'explorer de multiples facettes de la biologie végétale. Oïkosmos offre en particulier des opportunités formidables pour l'étude de la physiologie végétale à toutes les étapes de la production végétale : fécondation, germination, croissance et développement de la plante, formation du fruit, floraison, pollinisation et fertilisation. L'étude de la physiologie végétale L'optimisation des cycles biorégénératifs d'un ECA implique d'approcher la physiologie de la plante dans sa globalité (à l'échelle moléculaire, tissulaire et des organes végétaux) et en inclue les thématiques de recherche :

²⁷⁵ En 2015, un site pilote de 500 m² (soit 120'000 têtes de salade) était en place à l'Agropole de Molondin. CombaGroup enchaîne les levées de fonds, qui ont été de plus de plusieurs millions de francs suisses jusqu'ici, preuve de l'intérêt pour la technologie. Un site à production industrielle standard (1 ha permet la production de 1400 tonnes de salades) devrait être implanté d'ici la fin 2015 dans d'un site industriel à proximité d'un leader dans l'ensachage des aliments, évitant les coûts de transports et de mise en cageots.

◇ Biologie moléculaire et cellulaire végétale en ECA :

- identification des bases moléculaires du développement des plantes en conditions extrêmes : études du métabolisme des acides gras, des protéines végétales, des voies lignocellulosiques ;
- études des gènes influençant la période et le lieu de formation et la forme d'un organe végétal ;
- étude sur la régulation génétique des plantes sur les mécanismes de réparation de l'ADN, les facteurs de transcription (comme les PPARs, les récepteurs activés par les proliférateurs de peroxyosomes) ;
- étude de la biochimie des organelles végétales (chloroplaste, vacuole) et des structures végétales (paroi cellulaire, fibres lignocellulosique) ;
- étude de la stabilité génétique des environnements spatiaux (par exemple sur la susceptibilité des plantes aux radiations) ;
- études comparatives de la variation intragénomique des plantes²⁷⁶ basée sur des modèles comme *Arabidopsis thaliana* ou *Brachypodium* : détermination de panels de niveaux de résistance de plantes après croisement d'une souche présentant des gènes de résistance (p. ex. aux UV) avec une autre non-résistante; évaluation de l'impact de la variabilité intragénomique sur la productivité ou la morphogénèse, et de l'adaptation des plantes aux variations de l'environnement .

◇ Physiologie végétale en ECA :

- détermination des limites physiologiques en conditions extrêmes (température, sécheresse, croissance des plantes en milieu changeant, etc.) : investigations sur la nutrition des plantes en cas de stress nutritionnel chronique ; études de leur influence sur la productivité, sur l'allocation de nutriments, sur la compétition des plantes, sur la photosynthèse ;
- optimisation des bilans de matières végétaux d'une plante : production nette primaire des parties hétérotrophes (racines), ou purement autotrophe (feuilles) ; évaluation du cycle de l'eau : évapotranspiration, bilan hydrique, etc. ;
- caractérisation et évaluation de l'impact de stress physico-chimiques, biologiques ou nutritifs sur le système, à l'image : de la température sur les taux d'activités enzymatiques ; de l'humidité sur le cycle d'ouverture/fermeture des stomates, et donc sur les échanges gazeux ; de l'intensité et du spectre de lumière sur la croissance, l'activité photosynthétique, l'architecture et sur le développement des plantes (Graham et al. 2019) ;
- optimisation des solutions nutritives et étude de la dynamique de consommation des nutriments par les plantes supérieures en fonction du taux de photosynthèse (Wolff et al. 2013) ;

²⁷⁶ Une plante voit ces cellules se diviser plusieurs centaines de fois, des cellules souches à celles de l'apex, et présente une bien plus haute variabilité « intraorganisme » que les cellules humaines

- développement de méthodes pour contrôler l'excès d'absorption de nutriments, prenant en compte la sélection de cultivars accumulant moins de nutriments et/ou en développant des solutions moins riches pour la croissance des plantes (Wheeler et al. 1996).
 - contrôle atmosphérique : composition de l'air (concentration de gaz carbonique, d'oxygène, d'autres gaz, présence d'hormones végétales) ; vitesse de régénération de l'air ; taux d'échanges gazeux ; température ; pression ;
 - étude des phénomènes de redistribution de nutriments et de molécules assimilées, ainsi que ceux de (bio)accumulation et de stockage de biomasse comestible et non comestible ;
 - étude de transport de l'eau, des solutés (p. ex. phosphates), des métaux dans les plantes, des processus de transfert xylème-phloème ;
 - étude des taux de croissance et de l'architecture du système racinaire ;
 - étude des métabolites secondaires produits lors de perturbation (production de métabolites protégeant des dommages cellulaires en cas d'excès de lumière) ;
 - évaluation de la production d'hormones végétales (tige : éthylène ; racine : phénols) ;
 - étude des effets de phytohormones sur le développement (auxine, brassinostéroïdes) ;
 - étude de l'influence des plantes alentour sur leurs systèmes de défense ;
 - optimisation des interactions plantes-environnement, développement de milieu de croissance artificiel, contrôle des bactéries du milieu racinaire.
- ✧ Mécanismes de régulation du développement et de la morphogénèse des tissus et des organes végétaux en ECA:
- étude d'optimisation de la germination et de la maturation des graines (conditions de température, d'oxygène, taux de germination avec ou sans stress hydrique, dégradation de la cuticule, etc.) ;
 - optimisation de la symbiose bactérie-plante de la rhizosphère : amélioration des rendements de production (Sheridan et al. 2017);
 - étude de l'orientation des racines, des bourgeons et des feuilles pour le maintien de la productivité des plantes ; étude de la sénescence des feuilles ;
 - étude de la dominance apicale (action inhibitrice qu'exerce la région apicale d'une plante en pleine croissance sur l'initiation ou le développement d'axes latéraux) ;
 - étude des mouvements et des propriétés mécaniques des plantes ;
 - étude des rythmes circadiens des végétaux : évaluation de l'adaptabilité des plantes aux variations d'illumination ; détermination des gènes sensibles à la lumière et des régulateurs des photorécepteurs, des phytochromes ; suivi de la biogenèse des chloroplastes en fonction des conditions d'éclairage ;
 - étude de l'influence du phototropisme sur la croissance des et les propriétés mécaniques des

plantes²⁷⁷, tenant compte des phases de développements précoces et tardives des plantes, des mécanismes de perception et de transduction du signal, des interactions géniques déterminant le phototropisme (Kiss et al. 2014).

◇ Bioénergétique en ECA :

- étude des processus cellulaires de la photosynthèse (anabolisme), de la respiration (catabolisme) et des échanges gazeux : amélioration des rendements photosynthétiques, par exemple par l'optimisation de la teneur en RUBISCO²⁷⁸ de microalgues (valorisation du dioxyde de carbone par bioraffinage) ;
- développement et intégration de piles à bactéries basées sur des plantes et de cellules solaires microbiennes (Strik et al. 2011).

◇ Surveillance de la santé des plantes en système clos :

- monitoring du métabolisme végétal : mesures continues du rapport CO₂/O₂, d'hormones végétales comme l'éthylène ou de composés organiques volatils, humidité, éclairage) basé sur des senseurs électrochimiques, optiques ou encore composés d'oxydes de métaux disposés en matrice (Baratto et al. 2005).
- développement de nouveaux principes de détection : senseurs non invasifs pour l'analyse de la structure et de la fonction cellulaire, senseurs environnementaux, senseurs de la composition ionique des solutions nutritives ;
- développement de système de détection précoce de biomarqueurs végétaux ou de pathologies végétales (pathogénicité issue de champignons, de bactéries et de virus, voire de parasites ou d'insectes) ;
- développement de stratégies de protection des plantes aux radiations (réserve d'eau, enfouissement)
- accroissement de la résistance de la plante aux pathogènes par des éliciteurs biotiques endogènes (macromolécules provenant de la plante hôte) ou exogènes (pathogènes issus de la plante).

En parallèle aux investigations physiologiques, l'optimisation des cultures végétales nécessite des stratégies de gestion horticole en habitat clos adaptées. Par exemple, les plantes cultivées en conditions environnementales contrôlées peuvent présenter un haut indice de récolte permettant d'augmenter la

²⁷⁷ En complément des résultats d'études menées par l'ESA et l'entreprise allemande Astrium sur l'ISS via le « système européen de cultures modulaire » (European Modular Cultivation System - EMCS) :

www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Human_Spaceflight_Research/European_Modular_Cultivation_System_EMCS

²⁷⁸ La RUBISCO (ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase/oxygénase) est l'enzyme clé de la photosynthèse, qui peut atteindre 50% du contenu protéique du chloroplaste.

production de nourriture par surface et les rendements d'oxydation des déchets organiques en CO₂ (Wheeler 2003). Il s'agit également de stocker des réserves minimales de graines et de plantules vierges pour permettre un redémarrage en cas de catastrophe physique (irradiations) ou biologique (maladie nécessitant une stérilisation complète de la population végétale).

Des systèmes de cultures low-tech, typiquement des structures gonflables en forme de tunnels (Lehto et al. 2006) semblent pertinents pour des systèmes de production et de cultures de plantes en conditions minimales pour les latitudes extrêmes de pays comme le Canada (Bamsey, Berinstain, et al. 2009), Il s'agit d'élaborer des stratégies spécifiques pour les phases précoces de croissances (semence), pour la phase de production des cultures (maintenance, récolte des produits agricoles), pour les phases de production post-récoltes (sélection, emballage, pré-processing) ; pour la recherche de productivité maximum (surface cultivable limitée), pour la protection contre les pathologies végétales (forte contagiosité des milieux clos) (Bamsey, Graham, et al. 2009). Les stratégies de gestion horticolas en habitat clos recouvrent également :

- la conception, le développement et la validation du hardware (Finetto et al. 2010): chambres de croissance de cultivars en milieu contrôlé ; systèmes d'éclairage des plantes (voir §10.4) : intensité de lumière, qualité et durée de l'illumination (naturelle, artificielle, etc.), photopériode, rendement de la photosynthèse (irradiation photosynthétiquement active) (Yunze & Shuangsheng 2014) ; distribution de la lumière sur la canopée. système d'éclairage naturel basé sur l'utilisation directe du soleil sur Mars, en particulier via un collecteur parabolique²⁷⁹ (Drysdale et al. 2008).
- la conception, le développement et la validation de software pour : l'optimisation des conditions de croissances (environnementales) ; la modélisation et l'analyse de la performance via des simulations informatiques de la mécanique des fluides numériques (« computational fluid dynamics »), compatible avec les logiciels pour la gestion des aliments (voir §8.3.1.4 sur la préparation finale de la nourriture).
- le développement de nouveaux systèmes de sericulture permettant l'intégration de technologies de production sous serres et le développement de systèmes de cultures en conditions minimales (Guo et al. 2008) ;
- le développement de systèmes horticoles robotisés (semence, taille, récolte, serres automatisées (év. animalerie), robots d'assistance, biorobotique) (Erickson et al. 1996) ;
- le développement de systèmes d'imagerie 3D, analyse d'activités photosynthétiques, analyse de la croissance, thermographie, imagerie de la chlorophylle par microscopie fluorescente, imagerie (PET, IRM) ;

²⁷⁹ L'ensoleillement sur Mars est moindre par rapport à celui de la Terre (860 contre 2'000 $\mu\text{mol}^*\text{quanta}/\text{m}^2\text{s}$).

- le développement de techniques de phytoremédiation et de phytoextraction.
- ◇ L'optimisation de la productivité des cultures hydroponiques (agriculture hors-sol) :
- étude comparative de culture de plantes : sur différents substrats : neutre et inerte., type sable, billes d'argile, laine de roche²⁸⁰ ou de coco, etc. ; en variant les débits des courants de solutions nutritives, les apports en sels minéraux, en éléments essentiels à la plante ou en produits phytosanitaires ou le rythme nyctéméral des plantes (alternance jour/nuit) ;
 - développement de sols artificiels tels que des coussins d'enracinement pour optimiser l'humidification des plantes ou des « soil-like substrates », voir par exemple BIOS-3 (Manukovsky et al. 2005) ;
 - automatisation des cultures par optimisation des paramètres de température, éclairage, ventilation, et adaptation en temps réel des solutions nutritives en fonction de leurs stades de maturité, de la teneur en éléments nutritifs des solutions hydroponiques, du pH, etc. ; test des effets sur la croissance et le métabolisme des plantes ;
 - maîtrise de l'âge biologique des fruits et légumes : détermination de l'impact du stade de maturité (degrés-jours depuis la floraison, rapport sucres sur acidité, etc.) sur la valeur énergétique, nutritionnelle et sensorielle ;
 - étude comparative aéroponie vs ultraponie vs soil-like substrate (Liu et al. 2008) ; optimisation des cultures hydroponiques²⁸¹ avec pour buts : l'accélération du processus de maturation des fruits ; l'augmentation de la fréquence des récoltes par an ; la diminution des consommations d'eau ; l'obtention d'une croissance contrôlée et rapide ; la meilleure maîtrise des risques biologiques ; l'augmentation de la résistance aux insectes nuisibles ; la production un inoculum maîtrisé avec des plantes stériles ; la diminution du temps d'exploitation et de maintenance des installations ;
 - élaboration de stratégies de dématérialisation des infrastructures, des équipements et des installations constituant les serres (poids, surface et volume) : structures gonflables pour l'enveloppe, matières plastiques pour les bâches des tunnels ; poches à substrat ; développement de systèmes de croissance réutilisables ; recyclage du milieu de culture : milieu biodégradable minimisant le réapprovisionnement ; minimisation de la génération de déchets végétaux ;

Enfin, les missions Mars s'étalant sur plusieurs années, l'optimisation des emballages (plastiques, aluminium...) en vue de conserver au mieux la fraîcheur des aliments s'avère être une thématique de

²⁸⁰ Pour des exemples de substrats en laine de roche : www.grodan101.com/knowledge-center/rockwool-growing-substrate-hydroponic-systems

²⁸¹ Par exemple, pour une comparaison de leur production, les paramètres suivants peuvent être utilisés : concentration de CO₂ (entre 500 et 2000 μmol⁻¹), taux de photosynthèse (foliale), intensité lumineuse (entre 100 et 700 μmol m⁻²s⁻¹), etc.

recherche pertinente :

mise au point et utilisation de nouveaux matériaux pour le conditionnement de la nourriture : films alimentaires capables de préserver les fruits des bactéries et des moisissures, composés d'amidon ou de chitosane (substance extraite de la carapace de crustacés) (Cissé et al. 2015) ; et le design d'emballages sophistiqués : empilables, biodégradables, réutilisables, minimisant la masse et le volume, ou encore capables d'indiquer l'état de conservation à l'aide de capteurs (ex : rupture de la chaîne du froid, exposition à une humidité excessive).

8.3.1.3 *Le contrôle qualité des procédés et produits agroalimentaires*

Cette section approche la recherche en ECA connexe au contrôle qualité des procédés et produits agroalimentaires.

Historiquement, la production agricole s'est centrée sur une augmentation de sa productivité, parfois sans tenir compte suffisamment de la sélection de variétés et de l'impact des traitements sur la qualité finale des produits alimentaires. A présent, la qualité de l'alimentation, dans ses aspects sanitaires, nutritionnels et hédoniques, est au cœur des préoccupations aussi bien des consommateurs que des industriels de l'agroalimentaire et des professionnels de santé.

Dans l'espace, la nutrition joue un rôle clé dans le maintien de la performance, de la santé et de l'humeur des personnes qui la consomment (S. M. Smith et al. 2014), et d'autant plus si sa production s'effectue en système clos (Lane & Feedback 2002), ce qui la rend naturellement cruciale dans le contexte d'Oikosmos. On l'a vu (§7.3), les enjeux de biosécurité sont magnifiés en habitat clos, et toute dérive (bioaccumulation, contamination) peut affecter irréversiblement l'ECA. Une analyse critique des sous-systèmes est indispensable pour prévoir les dangers potentiels, évaluer les risques encourus et prescrire les moyens de contrôle nécessaires. Les risques sanitaires pour l'équipage doivent être maîtrisés autant que faire se peut. La maîtrise des procédés agroalimentaires implique un contrôle qualité tant chimique que microbien pour assurer une sûreté sanitaire et nutritionnelle des produits agroalimentaires frais et transformés.

En conséquence, la qualité (micro)biologique de l'ECA de la nourriture nouvellement produite doit être garantie et protégée au maximum, tout comme celle de l'eau, des surfaces, de l'air ambiant. Il s'agit de surveiller activement la qualité microbiologique (présence de bactéries, virus, levures et champignons indésirables, pathogènes végétaux, insectes ou parasites, voir §10.5) dans le simulateur d'ECA, et en particulier dans ses systèmes de production agroalimentaire, via des procédures de bioanalytique et de détection rapide (par RT-PCR) de micro-organismes pathogènes ou d'éléments génétiques mobiles (voir §8.2.3) dans les aliments.

Un simulateur d'ECA offre la possibilité d'évaluer simultanément les effets sur la santé et

l'environnement de différents mix alimentaires²⁸². L'alimentation en système clos cherche ainsi à combiner au mieux alimentation équilibrée, saine, durable, et sur mesure. Atteindre cet objectif nécessite en amont un contrôle qualité de la composition biochimique et nutritionnelle des produits agroalimentaires récoltés, qui englobe notamment les thématiques de recherche suivantes :

- optimisation de la qualité nutritionnelle (Cohu et al. 2014) (teneur en protéines, glucides, lipides, liquides, teneur énergétique totale, minéraux principaux, vitamines et autres oligo-éléments) : intégration des variétés de plantes produisant des substances aux propriétés organoleptiques, capables d'affecter un récepteur sensoriel humain (toucher, goût, odorat) ; caractérisation de l'influence des modalités de préparation sur la qualité de la nourriture : biodisponibilité des composés nutritionnels à chaque étape de la digestion (salivaire, gastrique et intestinale) ; amélioration de l'accessibilité des éléments nutritifs ou de l'absorption du contenu calorique des aliments végétaux ;
- développement de techniques de culture végétales optimisant les apports nutritifs et améliorant la santé des plantes cultivées, leur résistance aux conditions environnementales, le rendement agricole et la qualité nutritionnelle de la production (L. Brown & van der Ouderaa 2007) ;
- identification de la composition et de la teneur en métabolites primaires et secondaires, de micronutriments (caroténoïdes, polyphénols, anthocyanes, etc.), de macronutriments, de vitamines, et d'autres composés fonctionnels (pigments, polysides, composés d'arôme, composés bioactifs tels que lycopène) ; caractérisation de leurs activités biologiques et de leurs propriétés : antioxydantes, anti-inflammatoires, anti-hypertensives, antispasmodiques, antiasthmatiques, antimicrobiennes, etc. ; identification des réactions chimiques et biochimiques de dégradation pouvant conduire à l'apparition de nouveaux composés.

Oïkomos cherche encore à répondre à d'autres enjeux d'ingénierie de systèmes alimentaires visant à optimiser les procédés agroalimentaires, réduire les pertes post-récolte et limiter l'utilisation de produits chimiques (post-récolte, premières transformations) (Voit et al. 2006). Les sujets de recherche comprennent l'optimisation des procédés de déshydratation et de séchage, de désinfection, de stabilisation thermique et l'investigation des bases moléculaires des opérations, comme l'extraction, l'affinage des ingrédients ou les biotransformations des matières premières et ingrédients avec les outils de la nutriginomique (§8.3.2.2).

²⁸² Ces dernières années le couplage d'une alimentation à la fois saine et durable suscite un intérêt croissant en Suisse, en témoigne le Programme national de recherche : le PNR 69 « Alimentation saine et production alimentaire durable ». Débuté en 2013, le programme vise à élaborer les bases scientifiques (stratégies, outils, méthodes, processus, produits), axées sur la pratique, afin de favoriser en Suisse le développement d'un comportement alimentaire et de systèmes alimentaires durables ». Il s'agit donc de promouvoir en Suisse « une alimentation saine et de proposer des aliments sûrs et de qualité en quantité suffisante et à des prix abordables, en veillant à une utilisation efficace des ressources et à un impact environnemental réduit ». Site web du PNR 69 : <http://www.nfp69.ch/fr>

8.3.1.4 La préparation finale de la nourriture

La préparation de la nourriture doit satisfaire l'équipage tant dans l'exécution des recettes et l'ajustement de l'apport nutritionnel que dans le plaisir gustatif procuré par la consommation du plat. L'ESA l'a bien compris puisqu'elle a fait appel à des chefs étoilés comme Alain Ducasse, pour établir diverses recettes MELiSSA exploitant au mieux le nombre limité d'ingrédients à disposition dans l'ECA européen²⁸³.

Les étapes finales de la préparation culinaire englobent les thématiques et sujets suivants :

- ✧ l'élaboration de menus compatibles avec une diète équilibrée, en fonction des récoltes et des stocks de nourriture et d'ingrédients, avec l'aide de logiciels fondés des base de données nutritionnelles, facilitant la planification de cycle de repas, et optimisant le temps de préparation des plats et les quantités de déchets végétaux générés (J. Hunter et al. 1998; Cooper et al. 2012) ;
- ✧ l'établissement de menus doit en outre intégrer de multiples aspects tels que (Vodovotz et al. 1997) :
 - une acceptabilité suffisamment élevée pour que l'équipage ne s'en lasse pas sur une longue période : aspect, couleur, goût, saveur, texture, heure du repas : par exemple la qualité sensorielle doit être adaptée (gustative et visuelle). Il est d'ailleurs connu que les aliments en pilule, en tubes ou encore en cubes compressés ne sont guère appréciés par les astronautes, surtout pour de telles missions longue durée²⁸⁴ ;
 - une variété élevée d'ingrédients et de recettes obtenues à partir de ces mêmes ingrédients ;
 - un temps de préparation des ingrédients et des repas optimisés ;
 - une biodisponibilité des substances et des valeurs nutritionnelles optimales (voir ci-dessus) une fois les plats préparés ingérés ;
 - une diminution de la part des aliments non consommés²⁸⁵, des surplus cuisinés, établissements de procédures générant peu de déchets (perte issue de la préparation des végétaux et minimisation de la masse et la complexité des emballages) et consommant peu d'énergie.

²⁸³ À titre d'illustration les plats suivants ont été mis au point : gnocchis de pommes de terre, tomates et oignons farcis, nems de laitue, millefeuille de pommes de terre à la tomate, soupe glacée à la tomate fraîche, pâtes aux algues et fondue de tomates, risotto aux algues, riz et pannacotta au lait de soja, confiture de tomates vertes, etc.

Voir à ce sujet l'article du 14.06.2005 « Prêt pour un dîner sur Mars ? » sur le site de l'ESA :

https://www.esa.int/Space_in_Member_States/France/Pret_pour_un_diner_sur_Mars (dernière consultation le 30.12.2015)

²⁸⁴ Voir l'article du 19.11.2011 d'Alexandra Witze dans Science News :

www.sciencenews.org/view/feature/id/335795/title/Space_Eats (dernière consultation le 30.12.2015)

²⁸⁵ En Suisse, un tiers des aliments produits ne sont pas consommés et finissent dans les composts ou à la poubelle selon une récente étude des chercheurs João Almeida (Université de Bâle) et Claudio Beretta (École Polytechnique fédérale de Zurich), notamment au niveau de la production agricole (27% de denrées perdues), des processus de transformation de la nourriture (27%), et des consommateurs (46%). La situation est comparable dans bien des pays européens.

Voir le site web www.foodwaste.ch et le dossier de la Fédération romande des consommateurs : « La FRC veut faire maigrir nos poubelles » : www.frc.ch/dossiers/la-frc-contre-le-gaspillage-alimentaire/

- ◇ l'élaboration de stratégies, de procédures et d'équipements pour : la transformation de plantes fraîches en ingrédients et en aliments (blé en semoule ou farine, puis couscous ou pâtes, etc.) ; l'utilisation directe des plantes fraîches dans une recette, sans transformation préliminaire ; la stabilisation des ingrédients (après une étape de transformation) ; la production des ingrédients finaux (obtenus à partir d'ingrédients stabilisés) et l'intégration de composants additionnels ;
- ◇ la minimisation des manipulations finales en prévision de leur consommation en apesanteur (difficulté à trancher des ingrédients, à les contenir dans un récipient lors de la prise du repas).
- ◇ l'étude de la relation entre le consommateur (l'astronaute/l'équipier) et aliments produits par l'ECA), des raisons pour lesquelles ils sont appréciés (plaisir d'anticipation, vue, texture, goût, arôme, satiété, sentiments de récompense) ; suivi de l'évolution des sensations ressenties avant, pendant et après la consommation d'un aliment particulier ;
- ◇ l'étude des effets bénéfiques de l'alimentation sur la santé des consommateurs : gestion du poids, amélioration de la performance, de la qualité et de la sécurité, évaluation de l'action protectrice des nutriments ; étude de l'impact de l'alimentation sur les systèmes cardiovasculaires, respiratoires, endocriniens, etc. (voir §8.3.2.2).

8.3.2 La nutriginomique : les sciences omiques pour l'optimisation de la nutrition

Dans le domaine de la nutrition, les avancées en biologie cellulaire et moléculaire ont permis dans un premier temps d'observer au laboratoire l'effet sur la durée de vie de molécules administrées aussi bien à des micro-organismes et des invertébrés que des mammifères²⁸⁶. Les bases moléculaires de ces observations, à savoir les voies génétiques et les cascades enzymatiques, ont ensuite été découvertes à une vitesse fulgurante, grâce au progrès de la science et au développement d'outils puissants et aux coûts drastiquement réduits²⁸⁷. Par son approche large, la métabolomique (§8.2.5) permet d'analyser le lien entre la nourriture consommée et son effet sur le corps, par exemple via des études cliniques et génétiques de corrélations entre l'apport nutritionnel et la concentration dans les fluides corporels d'un panel de métabolites (Menni et al. 2012).

Les investigations de biologie systémique sur l'alimentation en habitat clos portent aussi bien sur la prédiction des risques pour la santé des organismes de l'ECA (« on sait ce que va manger l'équipage et on prédit l'effet sur l'expression des gènes et le métabolome »), que sur l'évaluation des effets de l'alimentation sur leur santé (« on sait ce qu'a mangé l'équipage et on mesure l'effet sur l'expression

²⁸⁶ Lire l'édition de Patrick Aebischer (Président de l'EPFL) « Manger à notre santé », Le Temps du 11.11.2009: www.letemps.ch/Page/Uuid/70d82fbc-ce49-11de-9427-6b8d19b6fac7

²⁸⁷ C'est par exemple le cas pour le séquençage du génome d'espèces dès la fin des années nonante, voir §6.3.1.

des gènes et sur le métabolome »).

Cette section passe en revue comment les sciences omiques présentées précédemment vont être utiles à l'optimisation de la nutrition, et est découpée de la manière suivante :

- les modifications épigénomiques induites par l'exposome (§8.3.2.1) ;
- la nutriginomique : l'étude de l'influence des nutriments sur nos gènes (§8.3.2.2) ;
- l'alimentation fonctionnelle et personnalisée : pour une vie en bonne santé prolongée : des aliments bénéfiques pour la santé (§8.3.2.3) ;
- la nutriginomique : un chaînon manquant entre séquençage et médecine personnalisée ? la recherche en nutriginomique au sein d'un simulateur d'ECA (§8.3.2.4)
- a recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (2/2) : de la nutriginomique et à la médecine personnalisée (§8.3.2.5).

8.3.2.1 *Les modifications épigénomiques induites par l'exposome*

En préambule, penchons-nous sur les implications des parties codantes et non codantes du génome sur les voies biochimiques impliquées dans la régulation de l'expression des gènes. Premièrement, seul 2% de l'ADN humain est codant, ce qui signifie que la grande majorité de notre génome ne code pas l'information contenue dans les acides aminés des quelques 25'000 gènes que contient dans chaque cellule humaine. En complément, près de 50% du génome est composé de segments répétitifs (gènes répliqués, vestiges de l'évolution, télomères, segments insérés par des rétrovirus) et environ 48% de régions inconnues (portions de chromosomes ultracompactées difficilement accessibles par nos méthodes d'analyse). Autrefois appelé ADN « poubelle » (« junk DNA » en anglais), cet ADN portait bien mal son nom. En effet, des projets comme ENCODE²⁸⁸ du « National Human Genome Research Institute » américain ont permis de démontrer que près de 80 % du génome humain est fonctionnel, c'est-à-dire possède une activité biochimique spécifique (The ENCODE Project Consortium 2007).

La régulation de l'expression de gènes et de la fabrication des protéines peut être induite par la méthylation de l'ADN (Geiman & K. Muegge 2009) ou par la transcription d'ADN non codant en microbrins d'ARN pouvant stopper la traduction des ARNm en protéines (Waterland & Jirtle 2003). D'autres mécanismes de régulation proviennent des facteurs de transcription, des protéines qui, après traduction cytoplasmique de leur ARNm par les ribosomes, retournent dans le noyau cellulaire et se positionnent sur des régions bien précises de l'ADN non codant : les promoteurs et les amplificateurs (moins de 0.1% du génome). Ces séquences spécifiques jouent le rôle d'interrupteurs en enclenchant ou empêchant la transcription d'ADN en ARNm de gènes. Relevons encore que les facteurs de transcription

²⁸⁸ The ENCODE Project: ENCyclopedia Of DNA Elements : www.genome.gov/encode/

restent collés à l'ADN lors de la division cellulaire et sont transmis aux cellules filles.

Bénéficiant aujourd'hui d'un essor certain, l'épigénétique étudie comment des altérations de ces protéines se répercutent sur l'activité des gènes et s'intéresse aux caractéristiques héréditaires non exclusivement définies par le code génétique²⁸⁹. Les phénomènes qui en découlent sont impliqués dans certaines maladies congénitales et certaines formes de cancers. Des biologistes de l'évolution ont démontré que ces modifications favorisent la survie d'espèces lors de phases critiques, en augmentant la diversité physiologique des individus (Gasser 2009). Par exemple, une mauvaise programmation épigénétique peut intervenir déjà au cours du développement de l'embryon, par le biais d'une nutrition maternelle déséquilibrée ou des troubles métaboliques maternels tels que le diabète ou l'obésité (Hervé et al. 2009; Bloch et al. 2007). Par la suite, des apports protéiques trop importants chez le nouveau-né (y compris par l'allaitement) seront à même de moduler l'expression de ses gènes (Reik 2001). Des expériences sur des modèles animaux, tout comme des études épidémiologiques humaines, montrent que des influences de l'alimentation et de l'environnement (consommation de tabac, exposition à des micropolluants ou à des perturbateurs endocriniens) subies par les parents et les grands-parents pourraient être transmises de manière transgénérationnelle, par l'intermédiaire de marqueurs épigénétiques qui pourrait continuer à exercer leur effet, qu'il soit bénéfique ou non (Cooney 2006). Des études ont démontré depuis que l'épigénome peut être transmissible et servir de véhicule à un risque accru de développer une maladie (Maher 2008), alors qu'il ne consiste pas en une mutation génétique. À titre d'illustration, une personne peut être influencée par le régime alimentaire de ses parents et de ses grands-parents. Une alimentation trop sucrée ou basée sur la consommation de poissons dotés d'une haute teneur en métaux lourds (comme le mercure) durant la jeunesse de ces derniers pourrait induire chez sa descendance des modifications de l'expression de ses gènes, une reprogrammation épigénétique qui pourrait être ensuite transmise aux petits-enfants eux-mêmes (McGowan et al. 2008).

L'épigénomique décrit les modifications du fonctionnement de l'ADN qui ne sont pas dues aux gènes eux-mêmes. Cette discipline démontre l'influence exercée sur nos gènes par des facteurs internes et externes comme l'activité physique et mentale, le comportement social, le stress, ce que l'on mange et l'exposition aux microbes et toxines environnementales. Ces facteurs agissent sur l'« épigénome » (l'ADN non codant), dont les séquences peuvent servir d'interrupteurs qui « allument et éteignent » l'expression des gènes et déterminent quelles protéines sont produites (et lesquelles ne le sont pas). Postérieurement, ces protéines exprimées déclenchent des voies métaboliques et des signaux impactant notre santé ou menant à une maladie.

L'utilisation des sciences omiques améliore notre compréhension de la manière avec laquelle les

²⁸⁹ Par voie de conséquence, en plus des défauts purement génétiques cités plus haut, des dérèglements épigénétiques peuvent perturber l'expression des gènes, par l'influence des parties non codantes du génome qui, si elles ne correspondent pas à des séquences protéiques, jouent pourtant un rôle crucial dans l'activation ou l'inhibition des gènes.

expositions interagissent avec nos gènes et aide à évaluer le risque d'apparition de maladies chroniques ou aiguës. Ce n'est que lorsque les interactions gène-environnement seront cartographiées plus soigneusement, la promesse d'une révolution génomique pourra alors être pleinement envisagée.

Dans le contexte des ECA, l'exposition à un facteur environnemental (comme un bactéricide) ou à certains nutriments peut induire une méthylation de l'ADN. Cette « étiquette » modifiera en retour la conformation spatiale de l'ADN à l'échelle de la chromatine et de ses histones, ou les affinités de liaison avec les facteurs de transcription se fixant sur une portion donnée de l'épigénome. De plus, l'exposition à l'environnement peut causer des mutations²⁹⁰ et le retour dans le noyau des facteurs de transcription peut également être induit par des stimuli extérieurs.

Ces mécanismes épigénétiques démontrent l'effet possible de l'environnement sur les organismes d'un ECA. Autrement dit, l'incidence de l'exposome (§7.3.3.1.a) est donc à même d'influencer l'épigénome des organismes en présence et, de réguler à la fois l'expression des gènes et la synthèse des protéines tout au long de campagnes de R&D au sein d'un simulateur d'ECA. Idem pour la nourriture ingérée, en particulier la combinaison et la qualité des macro- et micronutriments et des fibres absorbés, qui a la capacité d'influencer l'environnement moléculaire dans lequel baigne notre ADN, et indirectement d'allumer ou d'éteindre nos gènes.

En conséquence, il semble justifié de poursuivre des investigations épigénétiques dans le cadre d'Oïkosmos. Il s'agira de monitorer minutieusement les effets des modifications induites par l'exposome – et en particulier par l'alimentation – sur les parties non codantes du génome humain. Les thématiques recherche associées comprennent l'identification de marqueurs épigénétiques des organismes de l'ECA (nutritionnels, environnementaux, circadiens) et les éventuelles pathologies associées et l'étude de l'influence de modifications épigénomiques sur l'expression d'enzymes et d'hormones régulant le métabolisme, afin d'améliorer notre savoir sur les effets de variations des conditions écosystémiques.

Plus spécifiquement, l'effet de la nutrition à la fois sur le génome et l'épigénome fait l'objet du prochain chapitre qui porte sur la nutrigenomique.

8.3.2.2 La nutrigenomique : l'étude de l'influence des nutriments sur nos gènes

Dans un excellent ouvrage co-écrit par Wahli et Constantin (2011), des chercheurs du Centre intégratif de génomique de l'UNIL explorent l'approche de la nutrigenomique, qui s'intéresse aux perturbations métaboliques causées par nos régimes alimentaires modernes sur le patrimoine génétique dont nous

²⁹⁰ Pour de telles mutations géniques, on distingue les causes physico-chimiques (exposition aux UV, aux rayons X, etc.) de celles causées par les composés organiques de l'alimentation (ingestion de substances cancérigènes).

avons hérité. À la lumière de ces réflexions, les prochaines sections envisagent le potentiel de la nutriginomique pour l'étude des ECA, tout en essayant de démontrer les synergies entre les préoccupations de recherche sur ces questions et celles du programme Oikosmos.

Une nourriture quotidienne équilibrée – c'est-à-dire dont la composition en macro- et micronutriments²⁹¹ est équilibrée – favorise l'expression adéquate de nos gènes. À l'opposé, une alimentation inadéquate ou déséquilibrée peut mettre en péril l'intégrité du génome. Selon plusieurs études d'envergure (Fenech 2002; Ames 2006; Bull & Fenech 2008), des carences (voire des excès) en micronutriments peuvent causer des conséquences néfastes comparables aux dégâts moléculaires que font subir des expositions physiques (rayonnement UV, radiations) ou chimiques (substances cancérigènes). Elles peuvent entraîner des lésions oxydatives (voir le point 2 du §7.3.3.2.c sur l'exposition à des dérivés réactifs de l'oxygène et stress oxydants) causant des cassures de brins d'ADN non réparées, des méthylations excessives des chromosomes ou réduisant l'efficacité de la machinerie de réparation ou de l'ADN, ainsi que la fidélité de sa réplication.

Si les aliments ne modifient pas systématiquement l'information génétique contenue dans notre ADN, certains de leurs composants (comme les lipides ou les vitamines) exercent un contrôle épigénomique sur l'expression des gènes, en agissant comme des signaux capables de moduler leur activité. Dans une fructueuse recherche sur le cancer de la prostate, Ornish et al. (Ornish et al. 2008) ont montré comment la nourriture change l'expression de nos gènes en temps réel au cours des semaines ou des mois, lorsqu'elle est fondée sur les plantes, riche en nutriments et en phytonutriments et non pas lorsqu'elle est basée sur une alimentation industrielle, élevée en sucre et pauvre en nutriments. Dans cette vaste étude, 500 gènes contrôlant ce cancer ont pu être affectés positivement simplement en faisant manger à ses patients un régime d'aliments entiers, fondé sur des plantes. En outre, une alimentation hypercalorique explique en partie l'apparition de maladies liées à la nourriture, l'obésité et ses autres répercussions, le diabète, les problèmes cardiovasculaires, car le bagage génétique hérité de nos ancêtres a été optimisé pour des situations de restrictions caloriques²⁹². Si nos gènes prédisposent certaines personnes à souffrir de pathologies liées à l'alimentation, comme le diabète de type 2, ce que nous mangeons influence donc aussi directement notre génome. Graisses, sucres, vitamines et minéraux exercent une influence sur le niveau d'activité des gènes et peuvent également susciter des modifications

²⁹¹ Les macronutriments (glucides, lipides, protéines) sont la source de l'énergie nécessaire au métabolisme des organismes (pour son métabolisme de base, mais aussi pour sa croissance), tandis que les micronutriments (vitamines, minéraux, oligoéléments*, phytoéléments**) jouent le rôle de régulateurs. Si ces derniers sont nécessaires en quantité minimale, ils n'en restent pas moins essentiels pour le développement et le bon fonctionnement d'un organisme.

* Les oligoéléments sont des minéraux (iode, cuivre, chrome, fluor, zinc, etc.) dont l'organisme a besoin en très petites quantités, mais se révélant toxiques lorsqu'ils sont ingérés en trop grande quantité. Ils n'apportent pas d'énergie, mais sont indispensables au métabolisme des aliments, au renouvellement des tissus et renforcent les défenses immunitaires.

** Les phytoéléments incluent les substances végétales secondaires, des composés bioactifs produits par les plantes.

²⁹² Lire l'interview de Nathalie Constantin paru dans l'Uniscope n° 578 (2012) :

www.unil.ch/webdav/site/unicom/shared/uniscope/2012-2013/U578.pdf

transmissibles et parfois irréversibles de l'ADN qui, elles aussi, peuvent influencer l'expression des gènes sans forcément en modifier la structure primaire.

Comme le résumait bien Wahli et Constantin (Wahli & Constantin 2011), « les composants de l'alimentation interagissent avec notre patrimoine génétique à plusieurs niveaux [d'action] (...). Les composants du régime alimentaire régulent l'activité génétique en endommageant l'ADN, principalement en cas de carences en micronutriments, en modulant le profil épigénétique (modifications chimiques de l'ADN sans en changer la séquence) et en agissant comme signaux mettant en activité des facteurs de transcription. L'alimentation peut également agir directement au niveau de l'activation ou de la dégradation des protéines et métabolites présents dans l'organisme. »

Le domaine étudiant ces relations est appelé génomique nutritionnelle. Il s'agit d'une nouvelle science qui utilise les outils dérivés de la génomique pour étudier les interactions bidirectionnelles entre gènes et nutriments. Il s'agit de tirer profit des technologies omiques de pointe présentées précédemment pour analyser globalement – et systématiquement – l'ensemble des changements induits par les nutriments afin de caractériser les effets directs ou indirects des aliments sur la structure ou l'expression des gènes.

D'un côté la « nutriginétique » examine l'impact génétique de tel ou tel aliment et vise à élucider les bases héréditaires responsables de la variabilité des réponses individuelles à certains nutriments. De l'autre côté, la « nutriginomique » étudie les effets des aliments (macro et micronutriments) sur l'ensemble du génome humain, mais aussi les changements métaboliques et les impacts sur la santé humaine qu'ils provoquent²⁹³ (Grayson 2010).

À la différence de l'approche de la pharmacogénomique (§8.3.2.5), la récente discipline de la nutriginomique ne se focalise pas sur les effets d'une seule substance bioactive précise mais à une grande quantité de molécules, dont les impacts peuvent être divers et se combiner (Ghosh et al. 2007). Dans cette perspective, la nutriginomique se concentre sur la signature alimentaire, c'est-à-dire les effets de l'alimentation sur notre patrimoine génétique et son expression » (Wahli & Constantin 2011). L'exploitation de données omiques brutes produites en masse semble dès lors indispensable pour identifier de telles signatures génomiques globales (Rist et al. 2006). Les techniques de la nutriginomique permettent d'identifier des marqueurs biologiques servant d'indicateurs de stades précoces des dérèglements métaboliques pouvant mener à des pathologies (Kussmann et al. 2006). Ces marqueurs biologiques consisteront en de multiples changements mineurs qui devront néanmoins être

²⁹³ Car, explique le Prof. Wahli, « il suffit que les processus métaboliques soient dérégulés de quelques pour cent pour provoquer une prise de poids qui, au bout de quelques années, peut conduire à l'apparition du diabète de type 2 ». Et d'ajouter : « Au XXI^e siècle, le vieil adage "Dis-moi ce que tu manges, je te dirai qui tu es", du célèbre gastronome français Jean-Anthelme Brillat-Savarin, tend à se modifier en "Dis-moi ce que tu manges, les médicaments que tu prends et ton génotype, et je te dirai qui tu seras demain" ».

Lire l'article d'Elisabeth Gordon, « Nouveau régime très tendance: la nutriginomique », paru dans L'Hebdo du 11 mai 2011 : www.hebdo.ch/nouveau_regime_tres_tendance_la_nutrigenomique_102813_.html

spécifiques et suffisamment sensibles pour être détectés et mis en relation entre eux (van Ommen & Stierum 2002). En particulier, la variation du profil de ces indicateurs suivant le moment de la journée, l'âge, le sexe et l'activité doit être prise en compte. Dans cette optique, le potentiel de la nutriginomique repose en quelque sorte sur sa capacité à définir et suivre des marqueurs biologiques précoces de bonne santé, afin d'anticiper les effets de changements de diète ou de comportements, et d'éviter, à terme, d'avoir à suivre tel ou tel traitement thérapeutique.

Avant de détailler l'intérêt de la nutriginomique dans le contexte d'Oïkosmos, il est nécessaire d'introduire les enjeux d'une alimentation fonctionnelle et personnalisée.

8.3.2.3 L'alimentation fonctionnelle et personnalisée : pour une vie en bonne santé prolongée

Les aliments regorgent naturellement de molécules actives sur le plan biologique. Lorsqu'un effet nutritionnel bénéfique pour la santé est supposé – et dans l'idéal démontré scientifiquement – pour une de ces substances, l'industrie agroalimentaire s'attèle à élaborer des procédés permettant de les extraire et de les purifier à partir d'aliments, ou de les concentrer dans des produits alimentaires dits « renforcés ». Bien entendu, les industriels ont aussi la possibilité d'user d'OGM ou de procédés industriels pour synthétiser des molécules favorables pour la santé. Dans tous les cas, que leur origine soit 100% naturelle ou non, les multinationales de l'agroalimentaire comme Danone ou PepsiCo voient logiquement un intérêt aujourd'hui à mettre en avant les bénéfices sur la santé de leurs produits. En Suisse, Nestlé n'est d'ailleurs pas en reste. Au quartier de l'innovation de l'EPFL, le groupe a investi massivement dans son Nestlé Institute of Health Sciences (NIHS)²⁹⁴, un centre de recherche de pointe sur l'alimentation médicale inauguré en 2011. Les chercheurs du géant helvétique y travaillent ont pour mission de développer un savoir scientifique nécessaire à une nutrition personnalisée permettant à la fois de prévenir des maladies et de prolonger la vie. Si le phénomène n'est pas nouveau, un nombre croissant – et à terme de toute une gamme – d'aliments fonctionnels et d'alicaments estampillés « Nestlé » devraient être commercialisés. Aliment fonctionnel et alicament ? Qu'est-ce qui les distinguent des aliments traditionnels ? Quelles sont les propriétés que présupposent de telles dénominations ? Quelles sont leurs promesses ?

Un aliment fonctionnel (« fonctionnal food » en anglais) contient un ingrédient bioactif dont l'effet biologique est démontré. Celui-ci est généralement bénéfique pour la santé. Il peut s'agir d'aliments naturels auxquels on a ajouté un composé bénéfique pour la santé (yoghourt avec molécules anti-

²⁹⁴ Lire notamment l'article « Nestlé 2.0 l'ère de la nutrition personnalisée » paru dans le magazine Bilan du 05.10.2011: www.bilan.ch/articles/techno/nestle-20-l-ere-de-la-nutrition-personnalisee

cholestérol) ou éventuellement augmenté la concentration d'un composé bienfaisant existant (jus de fruit enrichi en minéraux, produits lactés enrichis en acides-gras oméga-3). Un alicament – mot-valise combinant aliments et médicaments – est quant à lui un ingrédient purifié et souvent un complément médical. Ils sont alors vendus sous la forme galénique de capsules, plutôt qu'associés à des produits alimentaires. Aussi appelé « nutraceutique », ce type d'aliment présente une efficacité physiologique bénéfique prouvée, par exemple pour prévenir des maladies chroniques. Par exemple, des phytonutriments (ou phytoéléments) peuvent être isolés par diverses techniques d'extraction et de distillation pour faire des compléments alimentaires ou les incorporer dans la constitution de médicaments ou de pommades. Sans oublier les superaliments (« superfood »), défini par l'Oxford English Dictionary comme « un aliment riche en nutriments, considéré comme particulièrement bénéfique en termes de santé et de bien-être », comprenant aussi bien des fruits et légumes (myrtilles riches en antioxydants, propriétés antimicrobiennes de l'ail, graines germées riches en micronutriments) que des microalgues comme la spiruline (riche en protéines, en fer). Ensemble, ces néologismes créés par l'industrie agroalimentaire constituent des exemples de compléments alimentaires qui seront les supports privilégiés de la nutrition personnalisée de demain.

Relevons que l'alimentation peut être influencée et éventuellement rectifiée par l'ingestion de bactéries, comme les « probiotiques ». Ces compléments alimentaires à bases de micro-organismes vivants sont résistants à la digestion, et peuvent modifier de façon bénéfique la flore colique de leur hôte (lactobacille, bactéries bifidus, etc.). De telles « bonnes bactéries » permettent de contrôler la prolifération de bactéries nuisibles. La croissance de la flore bactérienne peut être également stimulée par des « prébiotiques ». Il peut s'agir d'ingrédients alimentaires non digestibles comme les fructo-oligosaccharides qui peuvent induire un effet bénéfique sur la microflore du côlon.

Grâce à leur haute valeur à la fois nutritive et régulatrice, les produits de l'alimentation fonctionnelle de demain auront pour objectifs de prévenir ou de ralentir la progression de maladies cardiovasculaires, neurodégénératives ou gastro-intestinales et de rendre plus confortable la digestion, la gestion du poids ou celle du diabète, pour ne citer qu'eux.

Mais dans un premier temps, il s'agit déjà de vérifier si un alicament permet de mieux prévenir une pathologie chronique et d'aider à vieillir en meilleure santé. Avec ses approches à la convergence de la nutrition, de l'étude du métabolisme et de la santé, on imagine facilement l'utilité des sciences et technologies omiques pour accompagner le développement de tels produits. En offrant la possibilité de sélectionner un régime alimentaire en fonction de profils omiques communs de personnes au sein d'une population, la génomique nutritionnelle pourrait faciliter le développement d'approche de nutrition personnalisée (Hesketh 2012).

A titre d'illustration, l'alimentation sur mesure présente un potentiel certain pour la prise en charge de personnes âgées. Ces dernières sont plus vulnérables à bien des égards, de par les changements

physiologiques et sociaux du vieillissement, avec à la clé de fréquents problèmes de perte de poids et de malnutrition. Une diminution de l'appétit, causée par des changements de goût et d'odorat ou l'apparition de sentiments de solitude et de dépression, et d'autre part une ingestion de plus petites quantités en raison de difficultés à mâcher, de fatigues chroniques, ou de faible pouvoir d'achat sont autant de facteurs qui peuvent alors entraîner un cercle vicieux : la perte de masse musculaire diminue la force des séniors, causant à son tour une perte de mobilité et réduisant d'autant leur capacité de s'occuper de soi. L'importance de la nourriture sur le vieillissement a par ailleurs été démontrée scientifiquement par des études épidémiologiques sur le régime alimentaire (alimentation riche en polyphénols, en acides gras, etc.) (Rosenberg 2013). S'ils se nourrissent de manière inadéquate, ils se rétabliront plus lentement suite à une maladie, auront un risque plus élevé d'infections ou de complications en cas d'hospitalisation, et une moins bonne guérison. Dans un contexte de vieillissement de la population européenne, les séniors se profilent donc comme un des publics cibles d'une alimentation personnalisée, répondant adéquatement à leurs besoins spécifiques : que manger, en quelle quantité et à quel moment ?

Concrètement, les études diététiques basées sur la nutriginomique permettent l'identification de l'effet de substances bioactives issues de l'alimentation (Penn et al. 2010), que ce soit pour leur contenu en alicaments, en phytoéléments (polyphénols, etc.) (Ovesná et al. 2008; Manach et al. 2009), en fibres (Rasmussen et al. 2011), avec les profils métabolomiques associés tant au niveau cellulaire qu'au niveau de fluides physiologiques (sang, urine) (Llorach et al. 2009). En prévenant les carences nutritives, une alimentation sur mesure améliorerait aussi bien leur longévité que leur qualité de vie et consisterait prioritairement à prolonger la portion de vie en bonne santé, en évitant, limitant ou retardant certains des dérèglements métaboliques, inflammations et maladies dégénératives liés au vieillissement.

Combinées aux outils de la télésanté détaillés au §9.4, ces approches personnalisées favoriseraient en retour la prolongation de l'autonomie à domicile.

En conclusion, la recherche en nutriginomique aide à mieux appréhender les interactions moléculaires entre les aliments et le corps humain et semble ouvrir la voie vers une alimentation sur mesure, selon le profil génétique de la personne, son âge, sexe, activité physique, son environnement de travail.

8.3.2.4 La nutriginomique : un chaînon manquant entre séquençage et médecine personnalisée ?

Certains chercheurs estiment que des recommandations ciblées basées sur des profils nutriginomiques présentent un potentiel immense pour la prévention de pathologies comme l'obésité, le diabète ou l'ostéoporose, mais aussi les maladies cardiovasculaires et inflammatoires chroniques (Vergères & Sagaya 2007; Vergères 2010). De ce point de vue, la nutriginomique peut être perçue comme un des

« chaînons manquants » entre le séquençage du génome et la médecine personnalisée. Selon Benoît Dubuis²⁹⁵, président de BioAlps, le cluster des sciences de la vie de Suisse occidentale, cette médecine prédictive et individualisée est « [u]ne médecine qui profite des avancées techniques dans les différents domaines des sciences de la vie fondamentales, pour définir des traitements mieux adaptés aux patients. En d'autres termes, il s'agit de prescrire le bon traitement, à la bonne dose et au bon moment au bon patient. ». On parle aussi de médecine génomique, de médecine de précision et de soins de santé personnalisés. Cette médecine s'inscrit dans le contexte de la médecine des 4P (« P4 medicine »), une médecine du futur intégrant plus encore les données propres à la personne, et qui ne sera plus une médecine réactive, mais plutôt une médecine proactive, caractérisée par son approche prédictive, préventive, participative et surtout personnalisée (Hood & Friend 2011; Hood & Flores 2012).

Préconisée par une partie croissante du monde médical, la médecine personnalisée a d'ores et déjà connu un essor remarquable ces dernières années²⁹⁶. Elle peut être considérée comme une des applications de la médecine moléculaire et translationnelle, c'est-à-dire une intervention amenant les résultats scientifiques du laboratoire au patient. Ainsi, le test génétique (profilage génétique, screening, etc.) préalable d'un biomarqueur (ADN, ARN, protéine, etc.) par l'intermédiaire de technologies omiques décrites plus haut rend possible l'analyse efficace de fonctions et dysfonctions cellulaires de plus en plus sophistiquées d'un large spectre de pathologies. En procurant des informations sur les mécanismes responsables, pour une même maladie, de réponses différentes selon les profils des patients atteints, elles permettent d'effectuer des interventions médicales ciblées présentant théoriquement des taux de réussite nettement améliorés. Un des impacts de la médecine personnalisée est qu'elle permet d'amener non seulement l'information génétique au patient, mais aussi au citoyen, à l'image de la démocratisation des tests et analyses génétiques dès le début des années 2000²⁹⁷.

Toutefois, les perspectives réjouissantes d'alimentation et de traitement sur mesure ne doivent donc pas occulter le fait que nous ne connaissons encore que partiellement l'importance de chaque variation génétique et de leurs effets²⁹⁸. L'espoir fait parfois place à la déception, par exemple lorsque des

²⁹⁵ Cité dans l'article d'Elisabeth Gordon, « Médecine: vers le sur mesure », paru dans L'Hebdo du 30.10.2013.

²⁹⁶ PubMed, la principale base de données bibliographique dans le domaine de la recherche biomédicale du Centre américain pour les informations biotechnologiques (NCBI), a connu littéralement une explosion du nombre de « hits » liés aux mots clés personalized medicine et personalised medicine ces dix dernières années, passant de 850 en 2005 à près de 14'900 en 2016, démontrant ainsi l'essor que connaît cette discipline, les hits étant directement corrélés au nombre de citations et de publications traitant d'un sujet de recherche donné : www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed

²⁹⁷ L'accès à ses propres données génétiques ayant lieu en dehors de la sphère strictement médicale s'est accéléré récemment. Il a été facilité par le développement d'une pléthore d'entreprises proposant des tests ADN relativement bon marché sur Internet. Aujourd'hui, il suffit de cracher un peu de salive dans un tube, ou d'effectuer un frottis buccal avec un coton-tige, et d'envoyer le tout par courrier pour séquençage, et le tour est joué, moyennant au passage la dépense de plusieurs centaines à quelques milliers de francs. Voir par exemple le service knomeDISCOVERY (www.knome.com) ou les tests proposés par 23andMe (www.23andme.com), dont la cofondatrice, Ann Wojcicki, est l'épouse de Serguey Brin, cofondateur de Google.

²⁹⁸ Nombre de professionnels de la santé soulignent la difficulté d'interpréter de tels tests aujourd'hui, tout comme ils mettent un garde contre leur impact socio-psychologique. Aussi, les bénéfices exacts de ces approches restent flous et certaines des promesses considérées comme réalistes juste après le séquençage du génome humain ont été remises en question depuis.

La génétique ne semble pas à même de résoudre, à elle seule et par un séquençage partiel du génome, toute la complexité de

épidémiologues reconnaissent que, à part dans les troubles de gène unique comme le syndrome de Down (trisomie 21), nos gènes ne déterminent pas facilement notre destin. En élucidant quelques-uns des mécanismes qui conduisent au développement de certains troubles, les chercheurs et médecins constatent également qu'une même maladie peut prendre des formes très variées. Dans un article sur la génomique, les diabètes de type 2 et l'obésité, paru dans le *New England Journal of Medicine*, McCarthy (2010) a rapporté le peu de corrélation qui existe entre l'obésité, les diabètes et la composition génétique des patients. Même lorsque des marqueurs biologiques sont identifiés, la réalité montre combien il est encore difficile de généraliser avec succès les approches thérapeutiques de médecine génomique, en raison de la complexité de la prédiction des effets de substances pharmacologiques basées uniquement sur des marqueurs génétiques détectés par profilage génétique²⁹⁹.

Il reste difficile de prédire quelle sera l'importance de l'emploi de cette médecine sur mesure ces dix à quinze prochaines années et surtout d'anticiper ses résultats potentiels. Même s'il est limité à court terme, son potentiel semble néanmoins manifeste pour la prise en charge thérapeutique personnalisée de maladies, capables de cibler au mieux les prédispositions génétiques de l'individu soigné. On peut conclure que la médecine personnalisée vient compléter les indispensables examens traditionnels tels que les anamnèses du patient, les mensurations du patient (poids, taille, etc.), les mesures de paramètres physiologiques, les prélèvements sanguins, urinaires, ainsi que les biopsies, ses habitudes alimentaires et son contexte familial.

En dernière analyse, la nutrigenomique, de par son positionnement intermédiaire entre séquençage et médecine personnalisée, semble à même de jouer les premiers rôles dans l'intégration des sciences omiques pour l'évaluation de la santé et l'amélioration du bien-être, basé plus sur des aspects diagnostics et préventifs pour tout un spectre des affections liées à alimentation, plutôt que sur des aspects thérapeutiques, qui est plutôt l'apanage de la médecine personnalisée.

8.3.2.5 La recherche en biologie systémique au sein d'un simulateur d'ECA (2/2) : de la nutrigenomique et à la médecine personnalisée

Traditionnellement, la nutrigenomique s'intéresse à l'influence de la nutrition sur la régulation de l'homéostasie d'un organisme (Müller & Kersten 2003). L'originalité d'Oïkosmos serait d'étendre cette

l'organisme et des maladies qui lui sont associées. L'environnement, le comportement et les caractéristiques biologiques comme l'âge devraient toujours être pris en compte.

²⁹⁹ Le Prof. Vincent Mooser, médecin-chef du service de biogénomique au CHUV, estime lui aussi que, malgré ses promesses, force est de constater qu'il n'existe qu'un nombre limité d'exemples qui permettent d'envisager l'utilisation de marqueurs moléculaires (principalement génétiques et génomiques) dans le cadre de thérapies sur mesure pour le patient

Propos tirés de la présentation du Prof. Mooser donnée à l'UNIL le 07.06.2012, « Personalized medicine, are we there yet ? », à l'occasion de la conférence « World of Omics » dont le programme est consultable sur le web : www3.unil.ch/wpmu/fbmresearchday/programme/

approche à l'étude d'un écosystème complet et hypermonitoré et opérant en circuit fermé. Les technologies omiques s'avèreraient utiles pour décortiquer certains traits complexes de l'ECA.

En complément d'approches écotoxicologiques (§7.3.3.1.b), un simulateur d'ECA peut effectuer en amont des analyses moléculaires globales sur l'homme, afin de définir les marqueurs biologiques multimoléculaires et les signatures génomiques nutritionnelles associées à un régime alimentaire donné. L'approche pourrait se révéler pertinente en premier lieu pour la biosurveillance de l'homéostasie d'un ECA en se servant de ces signatures alimentaires pour détecter précocement des dérèglements métaboliques ou pour prévenir l'apparition de certaines maladies au sein de l'ECA, plutôt qu'avoir à les guérir, en détectant des changements mêmes infimes de sa composition. L'observation attentive de ces marqueurs biologiques précoces de bonne santé de l'ECA pourrait en outre s'effectuer de manière continue, sur de longues périodes et un nombre élevé de cycles (cycle de cultures végétales, cycles circadiens, cycles des repas, générations de micro-organismes, etc.). Pour un régime alimentaire constant, il sera aussi possible d'évaluer l'influence de variations des conditions écosystémiques et de repérer les déviations des teneurs d'ensembles de molécules, dont l'évolution signalerait la présence d'un danger pour l'écosystème si aucune intervention curative n'est entreprise.

Les simulations « grandeur nature » qui seront conduites dans le cadre de la préparation à un voyage vers Mars fourniront de parfaits sujets d'étude pour des chercheurs en nutrition, puisque l'alimentation de chaque membre de l'équipage sera personnalisée et suivie minutieusement³⁰⁰. Leur santé sera régulièrement vérifiée en prélevant des échantillons (sanguins, urinaires, etc.) à intervalle régulier, et les résultats des analyses omiques conservés dans des banques de données consultables ultérieurement pour étudier par exemple l'influence d'un paramètre environnemental (jour/nuit, fatigue, stress, etc.) ou celui d'un aliment sur l'expression d'un gène.

Bien entendu, de nombreux défis subsistent afin de prendre en compte la variabilité et la dynamique des profils omiques récoltés. Par exemple, les profils métaboliques ne sont en effet pas uniquement influencés par les conditions écosystémiques ou l'alimentation, et subissent des variations liées à la prise de médicaments, à l'exercice physique ou aux rythmes circadiens pour ne citer qu'eux. Il n'empêche que les méthodologies de la nutriginomique et la détermination de signature nutritionnelle permettront d'établir des recommandations nutritionnelles à l'attention des membres de l'équipage, fondées sur des faits observés dans le cadre de l'exploitation d'écosystèmes.

Une recherche d'envergure est notamment requise pour fournir des preuves scientifiques des effets positifs des aliments nutriginomiques, soit des aliments fonctionnels et des alicaments. Un démonstrateur d'ECA offre précisément l'opportunité d'étudier l'action de molécules bioactives

³⁰⁰ S'il est aisé de contrôler la nourriture de souris de laboratoire, il est beaucoup plus problématique de le faire précisément sur des études humaines pendant de longues durées, hors du contexte des habitats clos.

présentes dans ce type d'aliments, consommés quotidiennement et durant des périodes prolongées, par le biais de protocoles expérimentaux et de tests permettant d'évaluer leurs effets bénéfiques potentiels sur le bien-être et la santé de l'équipage.

L'habitat clos facilite la comparaison de régimes alimentaires qu'ils soient hypo ou hypercaloriques, ou enrichis (oligoéléments, micromolécules comme des acides aminés ou des acides gras essentiels, fibres, etc.), à des fins d'optimisation. Sur cette base, des stratégies alimentaires bénéfiques pour la santé pourront être définies, pour favoriser une « biofortification » de l'homme et éviter tout risque de carences nutritives, compte tenu du nombre limité d'espèces végétales à la base du régime alimentaire.

Malgré cet intérêt de la nutriginomique en habitat clos, il paraît important de garder à l'esprit que la nutrition personnalisée est généralement approchée dans une perspective épidémiologique (Kaput 2008) avec des bassins de populations étudiés autrement plus large que la population d'un ECA composée d'une poignée d'hommes et de femmes seulement. Avec le faible nombre d'individus participant aux expériences, les activités opérationnelles d'un simulateur d'ECA n'ont donc pas pour vocation première d'intégrer de telles approches. Certes, les conditions hypercontrôlées permettent d'éviter certains biais expérimentaux liés aux variations des conditions du milieu tout au long des études sur l'effet de substances bioactives. Néanmoins, il paraît tout de même difficile d'envisager la production des résultats expérimentaux concluants tels que des recommandations nutritionnelles qui puissent s'appliquer en dehors des conditions hautement maîtrisées du simulateur d'ECA, sur la base du nombre limité de génomes humains suivis. En effet, même en agrégeant les résultats de dizaines de campagnes de simulation, le pool de participants serait bien loin de ceux issus d'études épidémiologiques classiques de génomique nutritionnelle.

En revanche, rien n'empêche que la recherche en système clos puisse tirer parti d'un transfert d'approches omiques utilisées lors d'études épidémiologiques génétiques et d'essais cliniques. Les plus avancées d'entre elles pourraient être appliquées dans le simulateur d'ECA pour optimiser la biosurveillance de la santé humaine, et être étendues à la biosurveillance de la santé d'écosystème ultrasimplifié. Dès lors, il semble avant tout pertinent d'intégrer des méthodes et des outils d'analyses préalablement validés expérimentalement et statistiquement dans le cadre études cliniques d'envergure sur de vastes populations d'individus, à l'image ce celles effectuées dans le secteur pharmaceutique.

Avant les campagnes de simulation, les outils de la génomique nutritionnelle pourront déjà être intégrés progressivement aux processus de sélection des équipages des missions (§8.2.1), en complément de technologies omiques classiques, afin de prédire qu'elles pourraient être les participants les plus susceptibles génétiquement de développer certaines maladies à moyen-long terme selon les régimes alimentaires envisagés en identifiant des gènes à susceptibilité ou des gènes protecteurs.

Qu'ils s'agissent de synergies ou d'antagonismes, les substances actives circulants dans l'ECA devront faire l'objet d'une biosurveillance holistique de la santé de l'écosystème.

Dans le cadre d'une future mission humaine vers Mars, certains médicaments seront absorbés quotidiennement afin de lutter contre les effets néfastes des conditions spatiales (sur les tissus musculaire et osseux, sur le système immunitaire, etc.). Il paraît dès lors essentiel de s'intéresser au devenir dans l'ECA des substances pharmacologiquement actives et de leurs produits de dégradation. En système clos, la pharmacogénomique interviendra pour étudier l'influence des médicaments sur les gènes humains bien entendu, mais également sur ceux des autres organismes de l'ECA, comme le métagénome bactérien (voir §8.3.3 sur le microbiome). Cette pharmacogénomique « étendue » aux autres compartiments de l'ECA vise à prescrire la substance la plus adaptée pour soigner une pathologie apparue dans l'ECA, tout en évitant ou limitant ses effets secondaires sur toutes les espèces en présence. Idéalement, l'administration envisagée d'un médicament en ECA devrait faire l'objet d'investigations préalables approfondies : prescription des doses les plus adéquates selon le profil génétique individualisé, étude de la métabolisation par l'ECA, impact sur les organismes de la distribution, bioaccumulation possible dans un des compartiments, etc. Dans ce contexte, l'alliance entre la pharmacogénomique et la génomique nutritionnelle s'avère utile pour prendre autant que possible en considération les interactions entre les substances médicamenteuses et les régimes alimentaires de l'équipage³⁰¹.

Dans le contexte d'Oïkosmos, l'approche omique ne cherchera pas en premier lieu à mettre au point des traitements sur mesure pour un futur patient, mais plutôt à privilégier la sélection d'individus dont les prédispositions génétiques semblent compatibles avec les gènes (des autres organismes et membres de l'équipage) et les conditions particulières de la vie en habitat clos (voir §8.2.1), le choix des profils cherchant ainsi à prévenir les risques de développer des maladies dans un ECA. L'analyse transcriptomique des « patterns » de gènes exprimés et le suivi de l'évolution du métabolome (ou du métagénome) en fonction de l'alimentation, de modifications de l'exposome, ou encore de l'état psychologique pourraient virtuellement permettre d'identifier la signature génétique unique de certaines maladies, stress ou pollutions de l'écosystème clos. On imagine pouvoir distinguer et classer à terme un grand nombre d'états de santé ou de maladies typiques des environnements sous fortes contraintes que sont les habitats clos.

En parallèle, des stratégies pourront être élaborées et ajuster l'environnement interne par le régime, les nutriments, les probiotiques, les alicaments et la détoxification, afin de diminuer le risque d'apparition de pathologies chez les organismes de l'écosystème.

Il s'agit aussi d'offrir les thérapies les plus appropriées lorsque leur usage s'avère nécessaire, en premier

³⁰¹ En effet, comme le soulignent Wahli et Constantin (2011) : « [L]a prise d'un médicament peut interférer avec la digestion des nutriments, leur absorption ou leur métabolisation et peut influencer sur l'appétit. La nourriture peut diminuer ou augmenter l'efficacité d'un médicament ainsi que causer des effets adverses ou, au contraire, les neutraliser. On peut donc envisager la nourriture comme une aide précieuse dans l'absorption et la tolérance aux médicaments ainsi que dans l'optimisation de leur efficacité ».

lieu pour l'homme, mais aussi pour les végétaux et les micro-organismes, en fonction de leurs métabolismes et de leurs gènes.

Naturellement, nul besoin de faire appel systématiquement à la médecine génomique pour la surveillance ou le maintien de la santé de l'équipage d'un habitat clos, qui doit pouvoir aussi appliquer des solutions basiques en cas de souci médical avéré³⁰².

Aussi, la médecine en systèmes clos se focalisera sur la prévention et la prophylaxie de l'apparition de dysfonctionnements du corps ; la détection précoce de maladies chroniques ou aiguë, du stress ou la détection rapide de microbes ; et les thérapies et la réhabilitation des effets de l'inactivité physique, de l'isolation, de l'immobilisation (lors d'expérimentations de type « test-beds »), du vieillissement (ostéoporose), de troubles du sommeil (par un dérèglement circadien), de carences nutritionnelles et du stress.

Afin d'appréhender les formes variées que les pathologies des organismes de l'ECA peuvent prendre, les ECA combineront certes une médecine hyperscientifique, mais aussi une médecine plus traditionnelle basée sur des pratiques médicales poursuivies depuis des millénaires, avec des diagnostics établis sur ce qu'on voyait, sentait ou palpait, puis depuis près de deux cents ans sur l'étude de processus biochimiques ou cellulaires. Les patients (les participants des campagnes de simulation) étant par ailleurs bien connus du personnel traitant qui les suivront au jour le jour.

Dans le contexte de la préparation des vols habités, la médecine personnalisée pourrait permettre la mise au point de contre-mesures individualisées améliorant la sécurité et la performance des astronautes (Schmidt & Goodwin 2013). La recherche synergistique d'Oïkosmos pourrait améliorer la prise en charge des effets du vieillissement par l'élaboration de protocoles de médecine préventive et personnalisée du spatial applicables dans le contexte terrestre (Ongaro 2014).

Dans la perspective synergistique d'Oïkosmos, la nutrigrénomique en système clos permet ainsi d'envisager le design de stratégies alimentaires sur mesure et optimisées pour les ECA, et la mise en évidence de nouvelles interactions entre l'alimentation et le contenu (épi)génomique et métabolomique des organismes de l'ECA. Les thématiques et sujets de recherche comprennent :

- la personnalisation de la nutrition selon le génome, l'environnement (l'exposome), et le mode de vie (habitat clos) ;
- le développement de stratégies et de techniques permettant d'optimiser des apports nutritifs

³⁰² Par exemple, un ajustement de la dose de médicaments devant être ingérés peut s'établir en fonction de la mesure de réponses physiologiques par des méthodes classiques et simples, sans nécessiter de séquencer plusieurs génomes à des intervalles de temps réguliers après la prise de la substance en question, et de constater la présence ou l'absence de l'expression de gènes donnés. En cas de détection de bactéries pathogéniques, de simples antibiogrammes permettent également de déterminer quel antibiotique fonctionne le mieux, en fonction des bactéries présentes dans des échantillons prélevés sur ou dans le corps humain.

selon des objectifs ciblés: meilleur apport calorique, meilleure résistance à l'effet de stress oxydatifs, meilleure biodégradabilité, réduction du nombre de déchets métaboliques problématiques pour d'autres compartiments de l'ECA, etc.

- l'étude de l'influence des composants d'un régime alimentaire (macro et micronutriments) sur l'ensemble des gènes des participants à la campagne de simulation, ainsi que sur les changements métaboliques qu'ils génèrent, comme les cascades enzymatiques et les voies d'activation induites par l'alimentation ;
- le test des scénarios d'utilisation d'aliments fonctionnels dans des conditions maîtrisées : connaissance exacte des aliments consommés quotidiennement, possibilité d'ingérer des aliments en quantités parfaitement dosées, avec des heures de prise d'aliments bien déterminées, avec des conditions de préparation des aliments connues, durant des périodes prolongées.
- l'étude des effets positifs ou négatifs sur les fonctions biologiques de nutriments fonctionnels et d'aliments à haute valeur nutritive et régulatrice: tests d'ingrédients naturels, de superaliments, d'aliments, aliments médicalisés, nutraceutiques, nutricaments, etc.
- l'élaboration d'aliments nutriginomiques renforcés en micro ou macronutriments : « package nutritif » et de régimes personnalisés combinant les bons micronutriments afin de renforcer l'immunité, de prévenir l'apparition de maladies, d'améliorer la santé, de traiter des maladies chroniques, d'accélérer la réhabilitation de patients ; boissons enrichies en micronutriments, en antioxydants, en acides gras oméga-3, et autres ingrédients, que chaque consommateur pourrait combiner en fonction de son profil génétique ; prébiotiques et probiotiques ;
- l'identification de propriétés des micro et macronutriments et de leurs interactions entre ingrédients : investigations de type « pharmacodynamique » : quel effet provoque la consommation d'un nutriment fonctionnel sur chaque équipier ? et « pharmacocinétique » : comment un nutriment ingéré est-il métabolisé par l'organisme ?
- l'évaluation la biodisponibilité et la conservation des propriétés de molécules comme le lycopène de la tomate (en l'occurrence les propriétés antioxydantes de ce caroténoïde) ou les oméga-3 et le contenu protéique de la spiruline (en tant que « single cell protein », voir le §7.3.4.3.c) selon les modalités de préparation de la nourriture (Maiani et al. 2009) ;
- le test de compléments alimentaires et d'aliments prévenant l'apparition de maladies chroniques liées au vieillissement ;
- la détermination de marqueurs biologiques précoces de bonne santé de l'ECA (signatures génomiques, alimentaires, sanguines et urinaires associées à un régime alimentaire donné), à des fins prophylactiques, permettant d'analyser les états nutritionnels et métaboliques d'organismes ou de l'écosystème dans son ensemble, et potentiellement d'anticiper des pathologies métaboliques comme le diabète ;

- le développement et le test de contre-mesures (diététiques, pharmacologiques) lors de dérèglements de l'homéostasie d'organismes ou de l'écosystème entier, volontaires (à des fins expérimentales) ou non (perturbations imprévues de l'exposome) ;
- la constitution d'une biobanque collectionnant des échantillons tissulaires et sanguins associés à des données cliniques sur les membres de l'équipage (§9.2.3) ;
- le développement de tests nutriginétiques permettant de prédire d'éventuels risques ou de diagnostiquer des formes d'intolérance alimentaire ;
- l'établissement de recommandations nutritionnelles, spécifiques aux caractéristiques génétiques des humains et des organismes de l'ECA ;
- le développement de nouveaux tests de toxicité et de contrôle microbiologique des nutriments, basés sur le génotypage de micro-organismes (sécurité alimentaire) ;
- le développement de nouvelles techniques de fabrication, de transformation et de conservation d'aliments nutriginomiques caractérisés par une composition maîtrisée ; une biodisponibilité optimale aux composants actifs ; une interférence minimale avec l'action de nutriments issus d'autres aliments ; une variabilité du support à leur consommation (nourriture compacte, en poudre, boisson, etc.) (K. H. Sutton 2007).
- le développement des techniques de biofortification des plantes (Mayer et al. 2008) en augmentant la proportion de micronutriments, de phytoéléments et de métabolites secondaires comestibles ou substances végétales secondaires (caroténoïdes, phytostérols, polyphénols, glucosinolates, anthocyanes, etc.) (DellaPenna 1999), permettant de produire des « superfruits », et autres « superlégumes ». Par exemple, conception de nouvelles techniques de génie génétique pour le croisement et la sélection d'espèces de plantes naturelles, visant à générer de nouvelles variétés de plantes aux propriétés nutritionnelles recherchées.

La recherche en nutriginomique constitue ainsi un pas supplémentaire vers une maîtrise aussi complète que possible de l'alimentation d'un équipage évoluant en habitat clos.

8.3.3 La microbiomique : l'analyse de l'influence de la microflore commensale sur la santé des organismes

Ce chapitre dédié à la microbiomique introduit tout d'abord les notions de microbiome et de métagénome (§8.3.3.1), avant de se pencher sur les enjeux de l'écologie microbienne en ECA (§8.3.3.2) et sur la microbiomique en système clos (§8.3.3.3). Enfin, il se termine avec un exemple de bioingénierie de la nutrition basé sur les intestins artificiels (§8.3.3.4).

8.3.3.1 *Le microbiome et son métagénome*

En plus du système de support-vie biologique qui l'accompagnera, l'homme dans l'espace emportera forcément avec lui son propre écosystème. En effet, le corps humain est indissociable des micro-organismes qu'il porte sur lui et dans ses organes et offre de nombreuses niches écologiques à la flore – dite commensale – qui le peuple. Celle-ci comprend des bactéries, des levures et des champignons, mais également des parasites, des protozoaires, des mycoplasmes et des virus. Ces micro-organismes colonisent par exemple les muqueuses buccales, nasales, et vaginales, mais également la peau et bien entendu l'intestin, et vivent la plupart du temps en harmonie avec les cellules humaines. Il a été démontré que l'homme possède jusqu'à dix fois plus de cellules microbiennes que de cellules humaines, soit respectivement 10^{15} cellules ou cent trillions de cellules bactériennes par individu (Bengmark 1998). Ce nombre colossal de micro-organismes ne représente toutefois qu'un à deux pour cent de la masse totale du corps humain. À titre d'illustration, l'ensemble des bactéries de l'intestin ne pèse que quelques centaines de grammes. La microflore intestinale se forme très tôt par le contact avec la mère et les aliments. Ces bactéries sont absolument nécessaires à la bonne santé de l'être humain, car elles lui fournissent des substances indispensables au bon fonctionnement de son métabolisme parmi lesquelles on compte typiquement des vitamines, des protéines et des lipides. Si l'étude de l'ensemble des molécules trouvées dans notre corps indique qu'une bonne partie d'entre elles proviennent de la nourriture, la flore commensale n'est pas en reste puisque les bactéries qui la composent se nourrissent de ce que nous ingérons et produisent, telles de petites usines chimiques, une partie supplémentaire des molécules qui pénètrent dans notre corps (Oriach et al. 2016). Comme soulevé au §8.3.2.3, l'alimentation peut-être contrôlée et éventuellement rectifiée par l'ingestion de bactéries, comme les « probiotiques » et la croissance de la flore bactérienne peut être également stimulées par des « prébiotiques ». Enfin, la microflore joue également un rôle protecteur fondamental contre les bactéries pathogènes (Chiu et al. 2017).

Historiquement toutefois, les communautés de micro-organismes de la microflore humaine n'ont été que peu étudiées (Farré-Maduell & Casals-Pascual 2019). Leur influence sur le développement humain, la physiologie, l'immunité, et la nutrition est d'ailleurs longtemps restée presque entièrement inconnue. De nos jours, les sciences et technologies omiques apparaissent alors comme un moyen d'appréhender ces communautés de micro-organismes avec une approche systémique. C'est pourquoi la notion de microflore a tendance à se démoder, au profit de la notion de « microbiome », qui caractérise l'ensemble des micro-organismes commensaux vivant sur ou dans un individu porteur ainsi que leur milieu de vie. Étant extrêmement variés et difficilement cultivables, les micro-organismes du microbiome font actuellement l'objet d'études approfondies basées sur la « microbiomique », qui permet de les aborder dans leur globalité. Soulignons ainsi qu'à la différence d'autres approches, cette nouvelle discipline consiste à les analyser non pas en culture, mais directement par le séquençage des ADN bactériens. La microbiomique étudie le métagénome – qui correspond à l'ensemble des génomes de micro-organismes

– et leurs interactions avec leur microenvironnement, les aliments et l'exposome en général. Ces dernières années, deux microbiologistes américains, Stanley Falkow et Martin J. Blaser ont décrit le métagénome comme la pièce manquante du génome humain. En 2009, ils ont émis l'hypothèse que des changements rapides de la composition de la flore microbienne humaine causés par exemple par la disparition de certains micro-organismes puisse expliquer l'apparition d'un nombre anormal de cas d'obésité et d'asthme précoce dès l'enfance (Blaser & Falkow 2009). Dans *Nature*, Blaser stipule qu'une meilleure compréhension de notre microbiologie indigène peut mener à des améliorations de la santé humaine (Blaser 2011). D'autres études tendent à montrer que notre mode de vie et notre alimentation moderne, couplée à la surutilisation des antibiotiques pourraient avoir changé la population des micro-organismes intestinaux et provoquer des maladies (De Filippo et al. 2010). En conséquence, les microbes que nous élevons dans notre intestin pourraient en partie déterminer si un individu sera gras ou mince, enflammé ou en bonne santé. Des chercheurs américains ont par ailleurs illustré de manière éclatante le lien entre flore intestinale et obésité (B. D. Muegge et al. 2011). En transférant à des souris exemptes de flore intestinale, celle provenant de matières fécales humaines, ils ont démontré que la nouvelle population peuplant la flore est rapidement modifiée par un régime alimentaire surchargé en sucres et en graisses. Cette flore bactérienne se montre à son tour capable de rendre obèses des souris qui suivent un régime alimentaire normal. Toutes ces études indiquent que la bonne santé humaine semble être indissociable de celle de nos bactéries intestinales. Concrètement, l'ADN des bactéries commensales (leur métagénome) produit un métaprotéome qui a un impact significatif sur la santé de l'individu porteur (Ezzeldin et al. 2019).

Lancé en 2008, le projet de caractérisation génétique de la flore intestinale humaine MetaHIT (Metagenomics of the human intestinal tract)³⁰³, regroupant neuf organismes de recherche européens, quatre industriels (dont Danone) et un institut chinois, a permis le séquençage de 85% des gènes de la flore intestinale, établi à partir de 124 sujets représentatifs des populations nordiques et méditerranéennes. Les résultats de cet échantillonnage, publiés dans la revue *Nature* en 2010 (J. Qin et al. 2010), ont permis de cartographier un millier d'espèces bactériennes habituellement présentes dans l'intestin humain, et révèlent que chacun des donneurs en abrite au moins 170 et que la composition de la flore intestinale est relativement semblable entre individus, contrairement à ce qui était établi auparavant. Selon les chercheurs de cette vaste étude, l'approfondissement de notre connaissance de cet énorme répertoire de 3,3 millions de gènes, soit 150 fois plus que les quelques 25'000 du génome humain, ouvre de nombreuses perspectives d'applications dans le domaine de la nutrition et de la santé humaine. Sur l'initiative du National Institutes of Health américain (NIH), un consortium international « Human Microbiome Project »³⁰⁴ s'est fixé pour mission dès 2007 de générer des nouvelles ressources

³⁰³ Site web de l'étude MetaHIT : www.metahit.eu

³⁰⁴ Site web du Human Microbiome Project (NIH Common Fund) : <https://commonfund.nih.gov/hmp>

et technologies permettant la caractérisation complète du microbiome humain et l'analyse de leurs rôles dans la santé et les maladies humaines³⁰⁵. En évaluant le microbiome de 242 individus sains et issus de 18 parties du corps, les résultats du projet, également publiés dans Nature (The Human Microbiome Project Consortium 2012), ont notamment permis de démontrer que le microbiome de chaque individu est unique et que la variation du nombre d'espèces de micro-organismes à travers le temps chez le même individu est plus faible que la variation entre deux individus différents. Ces différences entre intra- et intervariabilité ne sont pas si étonnantes étant donné que les sujets sélectionnés pour cette étude n'avaient aucun lien entre eux. Une autre étude publiée dans Nature a montré le profil microbiomique du derme permet de distinguer des individus ayant touché des surfaces, comme les touches d'un clavier informatique (Gewin 2012). La connaissance des communautés microbiennes présentes sur la peau présente ainsi des applications potentiels en sciences criminelles. Ces mêmes chercheurs vont jusqu'à envisager le séquençage de la totalité du microbiome de la planète et se sont ensuite employés à démarrer sa cartographie de manière systématique, au travers du « Earth Microbiome Project », avec le soutien de sociétés comme Roche³⁰⁶. Enfin, le microbiome est influencé par les rythmes circadiens bactériens (Mihalcescu et al. 2004).

En moins d'une dizaine d'années, on peut constater que le microbiome, et en particulier l'écosystème de bactéries vivant dans notre intestin, a été relié à plus ou moins tout, de l'obésité au cancer (Payne et al. 2012), aux maladies cardiorespiratoires (Beck et al. 2012), aux maladies inflammatoires de l'intestin (Willing et al. 2010), au diabète et même aux troubles allergiques et auto-immuns (Blaser 2010). Si les études se confirment, la découverte de l'influence du microbiome pourrait s'avérer donc cruciale sur nombre de maladies de ce siècle. À terme, la recherche en microbiomique pourrait être à même de procurer de nouveaux traitements basés sur des changements de régimes alimentaires ou sur l'utilisation de probiotiques pour pousser l'écosystème intestinal vers un équilibre promouvant la bonne santé.

Avant de discuter l'intérêt de cette approche lorsqu'elle est utilisée en système clos, commençons par rappeler les enjeux de l'écologie microbienne en ECA.

8.3.3.2 Les enjeux de l'écologie microbienne en ECA

Dans sa définition du terme de « nutrition », le Grand Robert fait remarquer que dans le langage courant, « nutrition exclut les phénomènes de désassimilation (excrétion; respiration et sécrétion des végétaux) ainsi que la respiration des animaux ». Or la nutrition, au sens large, peut se définir par l'ensemble des processus d'assimilation *et de désassimilation* qui se déroulent dans un organisme vivant, incluant des

³⁰⁵ Site web du centre de données du Human Microbiome Project : www.hmpdacc.org

³⁰⁶ Site web du Earth Microbiome Project : www.earthmicrobiome.org

voies métaboliques et physiologiques indispensables au maintien de son homéostasie et à l'allocation de l'énergie à ses différents tissus et organes. Oïkosmos prend en considération la nutrition sous cet angle double, en se penchant non seulement sur les phénomènes d'absorption, de transformation et d'utilisation des aliments dans l'organisme, sans négliger ceux impliqués dans l'élimination des coproduits et déchets du métabolisme. L'étude en ECA des processus de désassimilation englobent en particulier l'analyse des interactions entre les micro-organismes du tube digestif et les nutriments avant leur absorption, les résidus du bol alimentaire non absorbés constituant les fèces, ainsi que les rejets métaboliques excrétés dans l'intestin. Autant de phénomènes appréhendables par l'écologie microbienne et l'approche de la microbiomique.

Branche de la microbiologie, l'écologie microbienne est au cœur des enjeux de la valorisation des flux de matières au sein d'un ECA (Somova et al. 1996; Somova & Pechurkin 2005). Pour rappel, un système biologique comme MELiSSA exploite des micro-organismes pour dégrader les (macro)molécules résiduelles dans les matières fécales de l'équipage. Il s'ensuit de nouvelles synthèses bactériennes et végétales dans les compartiments en aval.

L'écologie microbienne en milieu confiné est abordée à plusieurs reprises dans l'agenda de recherche décrit dans ce rapport :

- au §7.3.1.3 sur les biogéosciences (étude des relations entre plantes et bactéries ; écologie microbienne du sol) ;
- au §7.3.2 sur l'optimisation de la performance de cultures de micro-organismes au sein de (photo)bioréacteurs ;
- au §7.3.4.3.c sur l'architecture massivement parallèle (intégration de nouvelles souches de micro-organismes) ;
- au §7.4.2.2 qui traite du potentiel de transfert de technologie des bioprocédés de recyclage de MELiSSA ;
- au §7.4.4 sur la valorisation des coproduits des ECA par bioraffinage ;
- au §8.2 sur la biosurveillance et le maintien de la santé des organismes (virulence bactérienne, phénomènes de transfert horizontal de gènes en ECA) ;
- au §8.2.8 sur l'optimisation des souches micro-organismes grâce aux techniques du génie génétique et de la biologie synthétique ;
- au §8.3.1.3 sur le contrôle qualité chimique et microbien des aliments produits par l'ECA ;
- au §8.3.2.3 sur l'alimentation fonctionnelle en ECA (intérêt nutritionnel de probiotiques et de prébiotiques) ;
- au §9.2.1 sur la modélisation mathématique de systèmes biologiques complexes ;
- au §10.5 sur le contrôle de la qualité microbiologique de l'air intérieur et des surfaces de l'habitat et sur la problématique de la protection planétaire intégrée à l'habitat spatial sain.

Autrement dit, le rôle des micro-organismes de l'ECA présente de multiples facettes. Les processus microbiens peuvent par exemple être impliqués dans le recyclage des déchets, de l'air et de l'eau, la production de nourriture et de substances bioactives, la fabrication de produits biosourcés, ou encore la bioremédiation de micropolluants et la biosurveillance des conditions environnementales. Bien entendu, certains micro-organismes représente également un danger, s'ils peuvent endommager les aliments produits et les réserves de nourriture, détériorer les infrastructures et les équipements de la plate-forme expérimentale en formant des biofilms, ou provoquer des maladies au sein de l'équipage. Autant dire qu'il est crucial pour le succès des simulations ou missions en habitat clos de surveiller minutieusement les activités métaboliques des communautés microbiennes présentes dans l'ECA.

8.3.3.3 *La microbiomique en ECA*

La vie en commun d'individus au sein d'un simulateur d'ECA ou d'un habitat clos fait surgir un certain nombre de questions autour du microbiome :

- **Exposome.** Comment les conditions écosystémiques de l'ECA influenceront-elles les microbiomes de l'équipage ? Quelles seraient les modifications possibles sur les flores microbiennes commensales ? Quelles seraient les pathogénies potentiellement problématiques qui pourraient apparaître ? Quelle sera l'influence du microbiome sur les compartiment en aval impliqués dans le recyclage des matières fécales ?
- **Co-évolution.** Comment les microbiomes de l'équipage interagissent et (co)évolueront-ils, si ces mêmes personnes sont en contact direct ?
- **Uniformisation.** Est-ce que les populations de micro-organismes auront tendance à s'uniformiser chez ce groupe d'individus ?
- **Colonisation.** Si oui, quelles seront les espèces de bactéries et quelles seront les souches d'une même espèce qui coloniseront d'autres individus ?
- **Organes cibles.** Est-ce que certaines parties du corps seront plus sujettes à la colonisation et par quels organismes ?

Le protocole d'étude de l'évolution du microbiome qui devra être mis au point pour élucider les questions soulevées ci-dessus s'inscrirait parfaitement dans un programme tel qu'Oïkosmos. Les environnements tels que les habitats clos offrent un cadre adéquat pour mener des recherches en microbiomique et observer l'évolution intra- et interindividus des microbiomes présents au sein de groupes de personnes isolées et confinées sur de longues durées. Une collaboration entre la recherche spatiale et terrestre paraît d'autant plus judicieuse que les enjeux évoqués ici pourraient aussi avoir un

impact significatif sur le métabolisme et la santé des futurs astronautes en mission de longue durée (Van Houdt & Leys 2020).

On peut supposer que la colonisation de micro-organismes provenant d'un individu sain à un autre pourrait par exemple modifier le métabolisme du sujet (sa digestion) ou le pronostic d'une maladie qu'il contractera dans le futur. Par voie de conséquence, l'évolution du métagénome des microbiomes de l'ECA aura donc tout intérêt à être strictement contrôlée par des approches microbiomiques, probablement dès le recrutement puis de manière continue lors la préparation au sol et enfin dès l'envol des spationautes pour leur mission d'exploration planétaire. Sans compter que les conditions écosystémiques en vol incluront également la présence de radiations et de microgravité. Or, nous avons vu précédemment que cette dernière pourrait induire des phénomènes de virulence bactérienne (§8.2.3).

Afin d'effectuer une biosurveillance attentive de l'évolution du microbiome en milieu confiné, une ébauche de protocole en quatre étapes est proposée ci-après :

1. Échantillonnage

Tout d'abord, il semble recommandé qu'un minimum de six personnes, composé par exemple de trois hommes et trois femmes saines n'ayant eu aucun contact fassent partie de l'étude. Les procédures d'échantillonnages mises en place par le projet « Human Project Microbiome » décrit au chapitre précédent pourraient être utilisées afin de faciliter la comparaison des résultats obtenus. Idéalement, il faudrait prélever des échantillons sur quinze à dix-huit parties du corps chez les hommes et les femmes, respectivement. Initialement, deux à trois prélèvements devraient être effectués à des intervalles d'un mois avant la mise en contact des individus. Une fois les individus à l'intérieur de l'ECA, un prélèvement d'échantillons pourrait être effectués tous les trois mois, en évitant des contaminations interindividuelles. En envisageant une étude sur une année, nous aurons un total d'environ 700 à 800 échantillons à traiter qui permettraient la variation du microbiome intra-individu dans le temps.

2. Estimation de la biodiversité

La biodiversité des échantillons seraient ensuite estimée par 1) amplification des ARN ribosomiques 16s, 2) pyroséquençage des amplicons (454 Titanium séquenceur, Roche), 3) « blast » des séquences sur les séquences références des ARNs ribosomiques 16s selon la méthodologie du groupe de travail Jumpstart Consortium Human Microbiome Project Data Generation (Jumpstart Consortium Human Microbiome Project Data Generation Working Group 2012).

3. Détermination des différentes souches bactériennes

La détermination des souches des différents micro-organismes d'une même espèce se ferait par RNAseq utilisant un séquenceur HiSeq2000 (Illumina). Le multiplexage des échantillons pourrait être évalué lors d'une étude pilote afin de réduire les coûts de séquençage. L'alignement des séquences sur les génomes bactériens de référence serait effectué au moyen du programme Bowtie (Langmead et al. 2009) et la détermination des variants (« single nucleotide polymorphisms » ou SNP) par le programme SamTools (H. Li et al. 2009). Seules les séquences uniques à chaque espèce seraient prises en compte.

4. Analyses bioinformatiques additionnelles

Des analyses statistiques sur la variance et la covariance du nombre des espèces intra- et inter-individus ainsi que le taux de colonisation interindividuelle devront également être calculés au moyen des environnements R ou Matlab, et l'utilisation d'autres programmes d'analyses de séquence tels que Mothur pourrait également être envisagée (Schloss et al. 2009).

Les données microbiomiques associées offriront des perspectives intéressantes pour la biosurveillance de la santé des micro-organismes de l'ECA. En combinant judicieusement les sciences et technologies omiques décrites préalablement, cette approche permet de suivre étroitement l'évolution des systèmes de molécules microbiens ou de détecter précocement des accidents du génome. Il s'agit alors d'éviter que s'ensuivent des changements de la microflore microbienne amenant à de potentielles détériorations de la défense de l'organisme à des agents infectieux ou une baisse de performance des fonctions de support-vie de l'ECA.

L'étude de la composition des microbiomes de l'ECA servira de miroir des habitudes nutritionnelles et de l'état de santé de l'équipage. Ces recherches pourront ainsi déboucher sur des tests de diagnostic et des pronostics. On peut imaginer pouvoir à l'avenir influencer le microbiome pour améliorer (ou plutôt maintenir) la santé de l'équipage, par l'intermédiaire d'une alimentation à même de prévenir certains dysfonctionnements des bioprocédés de l'ECA et l'apparition de maladies à un niveau présymptomatique, ou encore d'élaborer des traitements les plus appropriés et adaptés possibles à chacun des sujets en présence, en fonction de leur prédisposition génétique et de leur métagénome respectif.

L'intérêt principal de ces approches est l'étude globale des modifications et des déséquilibres de la flore digestive selon l'alimentation (probiotiques), la prise de médicaments et l'état de santé (maladies inflammatoires chroniques, allergies, etc.). La maîtrise tant des flux entrants et que des sortants des bioréacteurs, tout comme la connaissance précise de la prise alimentaire et des médicaments ingérés offrirait la possibilité d'établir et de vérifier des corrélations supposées. Dans le simulateur d'habitat clos, il sera aussi envisageable de démultiplier les bioréacteurs de l'ECA recevant les matières fécales et de les opérer en parallèle en variant le contenu de leur flux entrant. Ceci devrait permettre de

déterminer l'impact de diverses configurations de l'exposome sur les différents systèmes de molécules propres à chaque compartiment de l'ECA. On peut imaginer d'alimenter chaque bioréacteur avec un flux provenant d'un seul « donneur » humain ou alors de changer de bioréacteur en fonction du régime alimentaire.

Puisque les microbiomes de l'ECA sont influencés par l'environnement et l'alimentation, l'approche de la microbiomique et les études métagénomiques caresse le projet de suivre de l'évolution de la flore microbienne humaine en fonction de variation de profils de l'exposome : selon les diètes hypercontrôlées, la présence d'éléments en trace, de médicaments, ou encore d'éléments génétiques mobiles échangés entre organismes, etc. Pour chacune de ces configurations, les thématiques et les sujets de recherche associés englobent :

- l'observation de l'évolution de l'activité métabolique de la flore microbienne : caractérisation du rôle des bactéries dans les processus de digestion ; dosage et évaluation des cinétiques d'absorption ; contrôle de la dynamique et de la croissance microbienne, étude des processus de dégradation et voies cataboliques bactériennes ; évaluation de la teneur en énergie des selles ; et analyse de l'impact sur la qualité des déchets organiques humains ;
- l'observation de l'évolution métagénomique : détermination des voies moléculaires bactériennes influencées par les différentes configurations de l'exposome ; détermination de la stabilité génomique et des processus d'adaptation génétique de la flore microbienne en fonction de la prise alimentaire ;
- l'évaluation des effets bénéfiques de l'administration de nourritures probiotiques microbiennes, ainsi que de prébiotiques sur le microbiome des membres de l'équipage (peau, salive, flore intestinale) et, sur cette base, l'établissement de recommandations nutritionnelles ;
- l'optimisation de la bioassimilabilité d'éléments minéraux (fer, zinc, etc.) issus de micro-organismes comestibles comme la spiruline ;
- l'identification de gènes microbiens qui pourraient être ciblés par des médicaments ;
- domaines d'application : traitement des déchets organiques, secteurs agroalimentaire, pharmaceutique et médical.

En résumé, la microbiomique en milieu confiné représente un levier d'intervention pour mieux organiser la cohabitation homme/microbes dans les conditions particulières d'un ECA.

8.3.3.4 Les intestins artificiels

Pour pallier à d'éventuelle dérive du système microbien survenant précocement, la plupart des compartiments microbiens de l'ECA seront inoculés à partir de souches bactériels originelles et

congelées, à l'exception notable du bioréacteur recevant les matières fécales (pour le système MELiSSA, il s'agit du compartiment liquéfacteur), ce dernier contient de facto un mélange de micro-organismes issus de la flore commensale de l'équipage. La coexistence d'un nombre élevé de souches bactériennes fait d'un tel compartiment un système complexe, à l'image d'extraits de sols (microcosmes), qu'il est nécessaire d'aborder par des approches « métagénomiques » dans lesquelles la totalité du matériel génétique est récupérée directement de l'échantillon. Les macromolécules végétales contenues dans les aliments consommés par l'homme sont découpées par les enzymes digestives via un processus d'hydrolyse. Le travail d'enzymes glucohydrolitiques comme l'amylase salivaire ou pancréatique, des protéases comme la pepsine gastrique ou la trypsine pancréatique, ou encore des lipases gastriques est complété par l'action des maltases et d'autres sucrases membranaires intégrées à la muqueuse intestinale. Ensuite, un compartiment microbien d'un ECA de type MELiSSA poursuit encore ce processus de dégradation, notamment par une digestion anaérobie qui générera notamment des acides gras volatiles de faible poids moléculaire (des micromolécules comme le lactate, l'éthanol, l'acétate, le formate, le propionate et le butyrate), de l'ammonium, de l'hydrogène du CO₂, ainsi que des minéraux. Ces micromolécules pourront alors servir des briques pour la biosynthèse de macromolécules bactérienne par les compartiments suivants.

Ainsi, il est possible de considérer ce premier bioréacteur bactérien comme un prolongement du tube digestif humain, dont leur rôle consisterait à poursuivre et compléter la métabolisation des déchets organiques. Ce bioréacteur initial joue en quelque sorte du rôle d'intestin artificiel, puisque les excréments humains y sont quasi directement canalisés, afin de procéder à des étapes supplémentaires de biodégradation des (macro)molécules organiques contenues dans les « déchets » humains, qui à l'issue de cette étape deviendront alors à leur tour des « ressources » pour le(s) compartiment(s) suivant(s), qui les absorberont à la sortie du bioréacteur, par analogie à l'absorption des molécules en provenance du bol alimentaire humain.

Par analogie, la recherche en ECA pourrait être couplée au développement d'intestins artificiels simplifiés, permettant par exemple d'enrichir notre savoir sur le devenir des aliments en fonction de leur qualité nutritive. C'est précisément l'objectif de la plateforme *NutriChip* développée au sein du programme fédéral de recherche Nano-Tera (§5.2.1.6.c)³⁰⁷. *Nutrichip* consistait en une reproduction fonctionnelle d'un tube digestif qui permet de tester les qualités nutritives des produits laitiers, avec pour enjeu de déterminer quels nutriments provoquent le moins de réponses inflammatoires du corps humain et de faciliter les processus de digestion, d'absorption et de métabolisation associés à leur consommation. En effet, certaines des molécules apportées par l'alimentation peuvent induire une inflammation qui entraîne à son tour l'apparition de biomarqueurs sanguins comme les cytokines. À

³⁰⁷ Le projet réunit plusieurs laboratoires de l'EPFL, de l'ETHZ, de l'Université de Bâle et de l'Agroscope Liebefeld-Posieux. Lire à ce sujet l'article de Laure-Anne Pessina sur le site web de l'Institut de microtechnique de l'EPFL : « Un intestin artificiel pour analyser la qualité de la nourriture », consulté le 01.07.2013 : <http://sti.epfl.ch/page-77453-fr.html>

terme, la maladie pro-inflammatoire peut s'installer de manière chronique chez le consommateur, s'il en consomme une trop grande quantité³⁰⁸.

Concrètement, un intestin artificiel se présente typiquement sous la forme d'une biopuce intégrant une double couche de cultures cellulaires séparées par une membrane semi-perméable nanoporeuse (Kopf-Bolanz et al. 2012). La première couche est composée de cellules épithéliales de la paroi intestinale. Quant à la deuxième, elle contient des macrophages présents dans la circulation. Ces cellules immunitaires jouent le rôle de biosenseurs sanguins intégrés. Ainsi, lorsqu'une solution nutritive est appliquée à la biopuce, des molécules vont être absorbées par les cellules intestinales, grâce à leurs protéines de transports membranaires par transcytose. Lorsque le macrophage détecte parmi ces molécules des facteurs de stress (fréquents dans les produits laitiers), il active les machineries moléculaires de l'inflammation qui induit la production de cytokines (interleukines), afin de communiquer l'information à d'autres cellules immunitaires. Ces biomarqueurs de l'inflammation peuvent être repérés par les senseurs optiques haute-résolution, par fluorescence (technologie CMOS) (Ramadan et al. 2011). Il est donc possible d'avoir une indication de la présence d'une inflammation provoquée par un aliment donné.

Oïkosmos pourrait bénéficier de ce type de dispositif de recherche visant à développer des parois intestinales artificielles miniatures et reproduites sur des biopuces. Celles-ci permettent d'envisager en particulier : l'application de solutions de digestion artificielles (mélanges d'enzymes salivaires, de sucs gastriques et pancréatiques et de bile) pour l'observation *in vitro* des effets des aliments sur la santé (dosage de biomarqueurs comme ceux issus de la machinerie moléculaire de l'inflammation) ; le criblage *in vitro* d'aliments pour comparer leurs propriétés pro- ou anti-inflammatoires : afin de sélectionner l'alimentation induisant le moins d'inflammation chez les personnes durant les missions ; et l'intégration progressive de microflore à des systèmes, afin de le complexifier.

³⁰⁸ Il n'est donc pas étonnant qu'un tel objectif intéresse des industriels comme Nestlé, qui souhaite étoffer leur gamme d'aliments fonctionnels (§8.3.2.3), en l'occurrence capable de prévenir les pathologies chroniques de l'inflammation

9 Investigations aux frontières de la recherche sur les technologies de l'information et de la communication

9.1 Les synergies de recherche liées au champ des technologies de l'information et de la communication

Dans la perspective de l'écologie industrielle, le simulateur d'ECA peut être considéré comme une boîte à outils pour l'analyse des flux de matières et d'énergie circulants au sein d'écosystèmes (§7.1.2). En complément, les technologies de l'information et de la communication (TIC) confèrent de leur côté au démonstrateur un atout supplémentaire dans le cadre du programme Oïkosmos, permettant d'envisager les ECA comme des écosystèmes informationnels (De Rosnay 2000). En se focalisant sur le suivi des flux d'informations et de connaissances qui s'y propagent, les TIC représentent un cadre pertinent pour l'établissement de synergies de recherche portant en particulier sur : les sciences computationnelles (§9.2), les technologies embarquées (§8.3) et la télésanté (§9.4).

9.2 Les sciences computationnelles

Les sciences computationnelles paraissent indispensables pour appréhender de manière approfondie la complexité des phénomènes prenant place au sein des ECA. Par exemple, un simulateur d'ECA offre des opportunités exceptionnelles pour des études de biologie computationnelle. Cette discipline, à l'interface des sciences informatiques et des sciences de la vie, permet d'interpréter les importants volumes de données issues des outils de la biologie systémique discutés au §8 : séquences d'ADN ou protéines exprimées par une cellule, métabolites circulants dans l'organisme, etc. De manière générale, les sciences computationnelles visent à tirer profit du déluge de données généré par l'hypermonitoring d'un ECA (§7.3.3), un « data mining » se révélant crucial pour le maintien de l'homéostasie de ce dernier (§9.3.2). Elles sont également utiles pour exploiter à bon escient l'ensemble des données non « omiques » de l'ECA comme celles produites par le suivi en temps réel de paramètres environnementaux caractérisant cet écosystème informationnel.

Concrètement, les sciences computationnelles peuvent être utilisées premièrement pour la modélisation mathématique des procédés de l'ECA, afin comprendre, prédire et surveiller son évolution des flux de matières circulant dans l'ECA (§9.2.1). Deuxièmement, la bioinformatique offre des solutions intéressantes pour caractériser et harmoniser les données omiques humaines (§9.2.2), une tendance émergente au sein de la communauté de chercheurs en médecine génomique. Enfin, les outils des sciences computationnelles permettent la modélisation numérique de données biologiques humaines (§9.2.3).

9.2.1 La modélisation mathématique des procédés de l'ECA

Des modèles sont nécessaires pour prévoir avec précision les bilans de masse et d'énergie dans les ECA (Boscheri et al. 2012). Pour cette raison, le développement et l'analyse des compartiments de la boucle MELiSSA sont intimement associés à l'élaboration préalable de modèles fiables pour chacun d'entre eux. Ce chapitre présente les enjeux de l'établissement d'un bilan stœchiométrique des flux de matières y circulant dans cet ECA.

Historiquement, chaque compartiment de MELiSSA a d'abord été analysé séparément (Poughon et al. 2009), via une approche orientée « processus chimique ». Après une comparaison et une sélection des processus, la stœchiométrie a d'abord été modélisée mathématiquement, puis validée avec les résultats expérimentaux pour les principaux éléments chimiques présents dans les organismes vivants, à savoir le carbone, l'hydrogène, l'oxygène, l'azote, le soufre et le phosphore ; puis pour les éléments minéraux comme le sodium, le potassium, le magnésium, le fer, etc. Lors des étapes suivantes, l'ensemble de la boucle MELiSSA a été simulée via une modélisation mathématique prédictive. Basée sur les équations stœchiométriques et la cinétique des réactions de l'ECA, ces modélisations intègrent aussi bien des contraintes physiques (lumière, taux d'oxygène ou de gaz carbonique) qu'organiques (quantité de nutriments disponibles) et sont indispensables à la stratégie de contrôle globale des ECA, de l'évaluation du bilan massique de l'état stationnaire au contrôle dynamique de la boucle (Gros et al. 2002; Fulget et al. 1999). En clair, la modélisation est une condition *sine qua non* non seulement pour la connaissance scientifique et pour le dimensionnement de la boucle et de ses besoins, mais aussi pour son contrôle (§7.3.3.2). Au final, ces modèles permettent d'étudier le comportement de la boucle, en se penchant sur la variation de valeurs comme la proportion de la biomasse microbienne et végétale dans la diète, afin par exemple de prédire le taux de croissance volumétrique des bioréacteurs et la qualité de la biomasse, et optimiser l'efficacité de la boucle.

Les composés impliqués dans les simulations en état stationnaire de MELiSSA sont typiquement les protéines, le glucose, l'acide palmitique, l'ammoniac, le nitrate, l'urée, les matières fécales, l'acétate, le butyrate, l'hydrogène, le gaz carbonique, l'oxygène, l'azote, l'eau, la biomasse de spiruline, la biomasse de plantes supérieures, et la biomasse de nitrificateurs. Par exemple, pour le compartiment IVa, le modèle mathématique développé comprend les cinétiques de croissance des micro-organismes et la distribution interne de la lumière à l'intérieur du photobioréacteur. Ce dernier dépend de la densité d'illumination, de la géométrie du bioréacteur, de la concentration des cellules, de l'absorption de la lumière, ainsi que des propriétés de diffusion des cellules (Cornet et al. 1998). Les modèles stationnaires n'étant pas suffisants pour définir une stratégie de contrôle robuste, la boucle a été également simulée avec des logiciels comme Matlab-Simulink et Ecosimpro, afin d'optimiser la performance des compartiments. La prédiction de la croissance est déductible des paramètres environnementaux, comme la température ou l'humidité relative au niveau des sous-systèmes, ou la nourriture, l'air, l'eau et l'optimisation du bouclage du système au niveau du système complet (Klanjscek & Legovic 2001).

L'objectif est à la fois d'anticiper les stress de cultures et leur stabilité à long terme, mais aussi d'élaborer des contre-mesures à appliquer le plus tôt possible en réaction aux stress auxquelles la boucle est à même d'être confrontée. Pour les cultures végétales, des modèles mécanistiques peuvent être utilisés (Cavazzoni 2004), par exemple pour la modélisation de la production de biomasse et la gestion des déchets, selon les variations quotidiennes des échanges de gaz dans la canopée, afin d'établir le calendrier de production ou l'index de récolte de l'ECA (Andre et al. 1994).

L'intérêt des modélisations mathématiques des procédés de l'ECA repose sur les thématiques de recherche suivantes :

- établissement de bilans massiques des flux entrants et sortants des compartiments, basés sur les équations stœchiométriques et la cinétique des réactions de l'ECA ; étude systématique des procédés mis en jeu et l'intégration au modèle des variations de contraintes physiques (lumière, taux d'oxygène ou de gaz carbonique) (D. Hu et al. 2012), ou organiques et physiologiques (quantité de nutriments disponibles, échanges de gaz) selon les scénarios de mission (durée, nombre de membres de l'équipage, espèces en présence) ;
- développement d'outils de modélisation prédictive pour la production de biomasse, le taux de croissance volumétrique des bioréacteurs, la qualité de la biomasse, la gestion des déchets organiques, etc. ; domaines d'application et utilisations possibles : aide à la conception de l'ECA : dimensionnement des compartiments (bioréacteurs, serres, unité de filtrations, etc.), optimisation des coûts, de la masse, de l'efficacité de recyclage, etc. ; analyse des conditions de fonctionnement critiques et optimales : test de robustesse, élaboration de contre-mesures ; aide à la décision pour la stratégie de contrôle globale ; établissement de calendriers de production.
- (photo)bioréacteurs : modélisation des dynamiques de croissance microbiennes ; système de contrôle de l'évolution des populations bactériennes ; domaines d'application : industriels de la biotechnologie.
- cultures végétales : modélisation de la physiologie (métabolisme végétal), de la croissance (développement morphologique) et du comportement des végétaux selon les conditions environnementales (lumière, échanges gazeux, consommation d'eau et de minéraux par les plantes) ;
- développement d'outils de simulation numérique et de protocoles de communication et de pilotage de l'ECA faisant appel à des algorithmes informatiques (Aydogan-Cremaschi et al. 2009) ;
- établissement de modèles mathématiques intégrant le régime alimentaire, afin d'obtenir des biomarqueurs métaboliques et nutriginomiques de la santé (Hesketh 2012).

Grâce à des technologies omiques toujours plus performantes, la vocation première de la biologie des

systèmes est d'intégrer les données dans des modèles conceptuels. Pour traiter l'avalanche d'information qu'elles génèrent³⁰⁹, les sciences omiques (§8.2) font appel à la bioinformatique, c'est-à-dire à l'utilisation de l'informatique pour étudier le vivant, dont le champ d'action se limite principalement aux macromolécules biologiques que sont les gènes, les protéines, etc.³¹⁰ Le stockage, l'exploration et l'interprétation de cette masse de données produites a pour but d'élucider les mécanismes de fonctionnement des systèmes d'éléments investigués, notamment en anticipant leur comportement et en prédisant leur évolution potentielle (voir §9.3.2 sur le data mining). La modélisation par la biologie computationnelle de l'activité de systèmes biologiques complexes semble pouvoir jouer un rôle essentiel à cet égard (Kitano 2002).

Le transfert de l'information « de l'éprouvette à l'ordinateur » passerait alors par des étapes incluant la récolte de données expérimentales, leur intégration au modèle, la simulation numérique de ce dernier, l'interprétation des résultats et la comparaison avec ceux observés lors des expérimentations. Il en résulte une interaction entre théorie, modélisation, observation et expérimentation, une procédure qui fournit depuis des siècles de nouvelles connaissances en physique.

Dans la perspective d'Oïkosmos, la modélisation mathématique des processus biologiques d'un ECA pourrait bien avoir de beaux jours devant elle, puisque ceux-ci évoluent en conditions hypercontrôlées. On peut envisager une modélisation des réseaux biochimiques des principales molécules de l'ECA. Les démarches de modélisation englobant l'ensemble des fonctions biologiques des ECA pourraient s'inspirer des travaux de consortium comme ceux du Physiome Project³¹¹. Ce projet ambitieux articule les ressources informatiques de diverses bases de données omiques afin de modéliser l'ensemble des fonctions physiologiques de l'organisme humain (« de la molécule à l'organisme ») (P. J. Hunter & Borg 2003; Bassingthwaight 2008). Les étapes successives de ces méthodologies comprennent la description des processus biologiques et des bases de données du modèle développé ; la formulation d'équations mathématiques à partir des modèles ; l'implémentation d'une simulation numérique des modélisations mathématiques ; la validation du modèle et l'interprétation biomédicale qui permettent de vérifier que la correspondance avec les observations expérimentales et permettre surtout de générer de nouvelles connaissances sur les processus physiologiques (Roux 2007). Dans le cadre du programme Oïkosmos, il pourrait s'avérer pertinent d'appliquer ces approches afin de modéliser l'ECA dans sa globalité, et de mieux réguler son homéostasie physiologique au niveau systémique.

³⁰⁹ En 2014, rien que les études menées sur le génome « génèrent chaque semaine des pétabits de données ». Lire l'entretien d'Elisabeth Gordon avec Ron Appel dans l'article, « La bioinformatique: un outil indispensable aux biologistes », paru dans la revue « Allez Savoir ! » du 23.01.2014 :

<http://www3.unil.ch/wpmu/allezsavoir/la-bioinformatique-un-outil-indispensable-aux-biologistes/>

³¹⁰ Fort de son potentiel, la bioinformatique est une discipline qui servait à l'origine surtout d'outil pour la recherche en sciences de la vie, est désormais de plus en plus utilisée par le monde médical dans la perspective de la « médecine de demain », la médecine personnalisée (§9.2.1)

³¹¹ Site web du Physiome Project : <http://physiomeproject.org>

Une réflexion sur les façons de représenter graphiquement les réseaux biochimiques semble pertinente. Au-delà des aspects esthétiques, il s'agit de matérialiser des interactions complexes et de leur donner un sens particulier. L'enjeu réside dans la bonne compréhension des phénomènes se déroulant dans l'ECA à des échelles spatiotemporelles variées. À titre d'exemple, des standards comme le Systems Biology Graphical Notation permettent d'établir des diagrammes des circuits moléculaires (Novère et al. 2009), dans lesquelles il est possible de distinguer les interactions entre des gènes, des protéines ou des processus biologiques tout en levant toute ambiguïté sémantique ou visuelle. Bénéficiant de support logiciel pour leur édition et leur traduction mathématique, ces représentations graphiques sont extensibles et peuvent se convertir en formalisme mathématique. En outre, ces outils ont l'avantage d'être généralement libres d'accès pour la communauté scientifique. Une représentation graphique des interactions et des relations moléculaires se déroulant dans les ECA à l'échelle écosystémique pourrait s'inspirer de tels systèmes de notation. L'intérêt réside par exemple dans la possibilité de simuler et distinguer les états d'équilibre selon les conditions (lors d'une phase de démarrage ou d'équilibre dynamique de l'ECA, avec ou sans perturbation, etc.), mais aussi de mieux appréhender la complexité des multiples composants biologiques de l'ECA (moléculaires, cellulaires ou tissulaires), et des processus biochimiques et voies métaboliques impliqués selon les configurations de l'ECA.

Pour atteindre un tel objectif, il est donc nécessaire d'intégrer et d'agencer les connaissances issues de modélisations biologiques se déroulant à des échelles spatiotemporelles variées : de quelques microsecondes pour des interactions moléculaires (échelle de l'atome : 1 Angström = 10^{-10} m), à des millisecondes pour l'activation des cascades enzymatiques de voies de signalisation métabolique (échelle de macromolécule : 1 à 10 nanomètres), à quelques secondes pour la motilité cellulaire (échelle de la cellule : 1 à 10 micromètres), plusieurs minutes pour la division cellulaire (échelle du tissu : 10 micromètres à 1 millimètre), jusqu'à quelques mois à plusieurs années pour le fonctionnement de systèmes d'organes et d'organismes entiers (échelle de l'organisme : de quelques (dizaines de) centimètres à plus d'un mètre). On l'aura compris, il ne s'agit pas d'une mince affaire, mais l'intérêt de ces méthodologies réside dans leur capacité d'aide à la décision pour la bonne gestion de l'ECA : effectuer des choix implique de pouvoir se baser sur – ou plutôt être confortés par – l'exploitation rationnelle des données omiques fournies par le suivi continu de leur santé physiologique humaine (de Bono & P. Hunter 2012).

Au sens large, la biologie systémique peut donc être considérée comme une branche scientifique des plus interdisciplinaires, permettant de percevoir la biologie également comme une science quantitative. En conséquence, la modélisation bioinformatique de réseaux biochimiques exige une coopération étroite entre des biologistes, des informaticiens, associés à des mathématiciens, des chimistes, des physiciens, et également des médecins³¹². Dans le contexte d'Oïkosmos, elle devrait permettre de prédire toujours

³¹² Voir SystemsX.ch, l'initiative suisse de biologie systémique : <http://www.systemsx.ch/>

plus finement le comportement et les réponses de l'écosystème à des variations des conditions environnementales, suite à des changements alimentaires, ou lors de l'apparition d'un micropolluant dans la boucle, pour ne citer que deux aspects parmi d'autres. Dans un deuxième temps, le partage et la publication des résultats et des connaissances acquises pourraient faire bénéficier d'un modèle à l'échelle d'un écosystème complet aux chercheurs de la communauté scientifique du non spatial.

9.2.2 La caractérisation et l'harmonisation des données omiques de l'ECA

La gestion et l'harmonisation des données de systèmes omiques variés, ainsi que leur bonne communication entre chercheurs sur les ECA constitue un des enjeux du programme Oïkosmos. La bioinformatique fournit des bases de données à grande échelle, utiles à l'identification et la caractérisation de molécules données, en particulier les gènes, les transcrits et les protéines, en fonction de leurs séquences respectives en acides nucléiques et acides aminés. Or, la gestion des informations issues de l'étude des différents systèmes de molécules est nécessaire à la compréhension et la détermination des voies métaboliques et des mécanismes de régulations moléculaires et cellulaires de l'écosystème. À ce titre, la bioinformatique offre des solutions intéressantes de gestion des données omiques de l'ECA, en facilitant :

- l'organisation et l'exploration des données omiques collectées, tant au niveau des organismes (génomomes, transcriptomes, protéomes, métabolomes, microbiomes, nutrigenomes) que de l'écosystème (exposome, métabolome) ;
- l'établissement d'une ontologie visant à organiser les données sur les ECA : l'élaboration des bases de données permet de structurer les éléments des principaux systèmes de molécules des ECA – gènes, transcrits, protéines, métabolites, oligo-éléments, mais aussi nutriments, produits de dégradation, micropolluants, etc. – par exemple de la manière suivante : élaboration de fiches d'information permettant de caractériser chaque entité de l'ECA (éléments qui le composent), dans le but les cataloguer en type ou en catégories (nature de la donnée) ; détermination des champs décrivant chacun des éléments d'un système de molécules (ci-après dans le cas d'un gène) : nom standard, type, description, annotations (fonction principale, processus biologiques dans lesquels l'élément est impliqué, localisation cellulaire), rôle de régulation, phénotype normal, mutants éventuels, interactions physique ou génétique connues, dosage usuel, phénotype en cas de suppression, phénotype en cas de biosynthèse défectueuse, etc. ; et compilation de l'ensemble des fiches d'information : catalogue de gènes, de protéines, de micropolluants, etc., permettant d'obtenir une hiérarchie et une taxonomie des entités qui composent l'ECA.
- le développement de système de gestion de l'information du laboratoire (« Laboratory Information Management System » ou LIMS) spécifique à un ECA donné, dont les

fonctionnalités incluent la gestion d'éléments comme les séquences, données techniques des articles, échantillons et méthodologies ; ainsi que l'analyse comparative des données, la traçabilité des lots, la gestion des incidents, de la qualité, et enfin le monitoring des résultats³¹³.

Il s'agirait également d'effectuer une « annotation fonctionnelle » des éléments, dans le but de pouvoir associer les fonctions connues de l'ECA à un ou plusieurs gènes, ou de corréler les substances de l'ECA avec leurs composants cellulaires, leurs processus biochimiques et leurs voies métaboliques respectives.

Un simulateur d'ECA pourrait faciliter des procédures de standardisation de différents domaines technologiques de la biologie systémique, comme la notation graphique des réseaux biochimiques (représentations graphiques des connaissances) (Roux 2007), ce qui faciliterait les échanges de données entre les groupes de recherche, ce qui favoriserait en retour l'élargissement de la communauté scientifique impliquée dans la recherche sur les ECA.

En résumé, il s'agira d'intégrer et d'uniformiser les grandes masses de données environnementales et biologiques produites par les multiples approches, technologies et outils de monitoring des ECA, afin : de réduire suffisamment leur hétérogénéité ; d'accélérer l'identification et la caractérisation de ces éléments ; de pouvoir représenter les composants et les concepts biologiques (et leurs connexions associées) de manière claire, précise et cohérente ; et de faciliter l'échange des données, leurs compilation, comparaison et combinaison, en évitant au maximum toute interprétation ambivalente.

Rappelons enfin que l'apport de la bioinformatique sera prépondérant dans la sélection des espèces des ECA, aussi bien pour celle des micro-organismes, des végétaux, que celle des membres de l'équipage, comme on l'a évoqué au §8.2.1.

9.2.3 La modélisation numérique de données biologiques humaines

Le rêve ultime de certains chercheurs envisage une médecine radicalement plus personnalisée, comme introduite au §8.3.2.4. Ce changement de paradigme s'appuie sur des approches génétiques et des modèles informatiques issus de la recherche contre le cancer, qui ont ensuite touché de nombreux autres domaines des sciences biomédicales (Alyass et al. 2015). L'enjeu consiste à faire bénéficier aux patients atteints d'un cancer de chimiothérapies efficaces, en réduisant la proportion de traitements mal ciblés. Acquérir des données génomiques, biologiques et physiologiques est devenu bon marché, ce qui induit une accumulation exponentielle d'informations. Or, la réactivité des technologies et leurs capacités d'analyse ne suivent pas cette formidable croissance. En conséquence, les délais d'interprétation des

³¹³ Pour des extraits des fonctionnalités du LIMS, voir le site Actors Solutions : www.actors-solutions.com/Gestion-de-Laboratoires-LIMS

masses de données collectées s'allongent. Les médecins ont à présent besoin d'outils pour traiter rapidement des informations complexes et les rendre compréhensibles et donc plus facilement exploitables.

Pour illustrer les initiatives cherchant à rattraper ces décalages, signalons un des projets Flagship de l'UE finalistes en 2012, le projet « IT Future of medicine » (ITFOM)³¹⁴. Ce dernier prévoyait de réunir institutions de recherches, entreprises pharmaceutiques et sociétés informatiques, avec pour objectif commun la création de « patients virtuels », aussi appelés « avatars médicaux ». Constituer un avatar numérique nécessite tout d'abord de développer les modèles numériques intégrant l'ensemble des voies de signalisation moléculaires décrites pour l'être humain, ainsi qu'un maximum de données médicales de personnes comme leurs génomes séquencés, leurs données morphologiques, physiologiques et hématologiques, mais aussi leur dossier médical complet (maladies, antécédents familiaux) et leurs habitudes sportives et nutritionnelles.

Sur la base de cet immense catalogue de données alimentées de ces informations spécifiques, un double virtuel du patient peut être modélisé et aider à la sélection des thérapies les plus efficaces lorsqu'une maladie est diagnostiquée (cancer, diabète, etc.) en effectuant : l'analyse de la maladie ou de la tumeur en ajoutant à l'avatar des données moléculaires, sanguines, physiologiques et anatomiques, etc. ; le test des traitements sur le modèle numérique ; ou le dosage le plus adéquat et adapté aux spécificités de l'individu ; l'administration du médicament sélectionné au patient. Le frère numérique pourrait aider à prévenir certaines maladies en alertant du risque éventuel de développer une maladie métabolique, par exemple en recommandant un régime alimentaire spécifique. À terme, un avatar médical est censé offrir des opportunités inédites, modifiant la façon avec laquelle les données des individus sains et des patients seront collectées. A l'image des outils de prévisions météorologiques, le traitement algorithmique continu de données médicales anonymisées de nouveaux patients améliorerait sans cesse le modèle. Ces modèles peuvent aboutir à la simulation d'un « humain physiologique virtuel », comme les travaux de certains des initiateurs du projet Physiome sur le consortium européen « Virtual physiological human » dont l'EPFL faisait partie (P. Hunter et al. 2013).

À la limite entre science et fiction, le concept de « patient virtuel » offre des perspectives de recherche intéressantes pour le design et le test de thérapies mieux adaptées pour traiter certaines maladies. Ces approches pourraient permettre d'identifier en amont de mauvaises voies de recherche fondamentale et clinique et pour catalyser le développement de nouveaux médicaments. En emmagasinant ces informations génomiques, morphologiques, métaboliques, nutriginomique et épigénétiques d'un individu, ainsi que l'ensemble de son dossier médical, la mise au point d'avatars numériques s'attelle à mieux organiser et exploiter le tsunami d'informations médicales qui ne cessera d'augmenter ces

³¹⁴ Site web du projet ITFOM : www.itfom.eu

prochaines décennies. Parmi les enjeux figurent aussi les modalités d'actualisation et de vérification continue des données tout au long de la vie des individus possédant leur double numérique, tout comme leur anonymisation et leur sécurisation.

Dans le cadre du programme Oïkosmos, ce rapport a cherché à démontrer que l'un des principaux enjeux de la mission repose sur le suivi continu de la santé des organismes qui nécessitera l'analyse aussi rapide que possible, quasiment en temps réel, d'un volume important de données collectées : des données omiques (génome, métabolome, etc.), de données physiologiques traditionnelles (fréquence cardiaque, pression sanguine, etc.) et des conditions environnementales (exposome).

En ce sens, le patient virtuel est une étape supplémentaire en direction d'une interprétation plus complète et d'une meilleure utilisation des données de l'ECA. On peut envisager que chaque membre de l'équipage possède son double virtuel dès les procédures finales de leur sélection, qui servirait ensuite d'assistant au sol pour prédire, et aider à prévenir certaines des évolutions physiologiques, voire psychologiques des participants à la mission.

Les thématiques et sujets de recherche en lien avec le développement d'un avatar médical ou d'un patient virtuel englobent :

- le développement de procédures simplifiées et automatiques de récoltes des données médicales d'un équipage vivant en habitat clos ;
- le développement d'avatars numériques modélisant les données omiques et physiologiques des (futurs) membres de l'équipage de l'ECA intégrant par exemple : le génome séquencé des cellules ; l'ensemble des voies de signalisation moléculaires décrites pour l'être humain ; les informations sur leur physiologie (p. ex. données hématologiques), leur métabolome et leur anatomie ; les paramètres et les conditions environnementales (exposome) de l'ECA ; le contenu métagénomique du microbiome ; le contenu exact des apports nutritionnels et les activités sportives effectuées ; les dossiers médicaux complets.
- la simulation informatique des processus biologiques des membres de l'équipage, afin : d'évaluer l'influence de la modification des paramétrages de l'ECA : variations conditions environnementales de l'habitat, introduction de régimes alimentaires alternatifs, etc. ; de tester les capacités de l'avatar à prédire l'évolution de la santé de l'équipage et à détecter précocement l'apparition de maladies ;
- d'analyser des maladies diagnostiquées en cours de mission et de tester des traitements afin d'attribuer la thérapie la plus efficace, par exemple en sélectionnant la dose la plus adéquate et adaptée aux spécificités de l'individu.

Toujours grâce aux outils des sciences computationnelles, le développement d'algorithmes d'intelligence artificielle, de programmes autoapprenants et de robotique permettrait d'automatiser

l'analyse statistique des jeux de données récoltées en continu dans l'ECA. Les thématiques de recherche associées incluent :

- l'analyse a posteriori des données scientifiques récoltées, mais non utilisées en cours de missions (en particulier celle à partir de données omiques) ;
- le renforcement des capacités la résolution de situations imprévues, complexes et/ou potentiellement dangereuses d'équipes homme-machine ;
- le développement d'interfaces permettant de présenter les résultats de manière compréhensible, claire et intuitive, y compris via des interfaces humanisées (robot, hologramme, etc.) ;
- le développement de robots effectuant diverses actions ciblées comme : la gestion des expériences scientifiques nécessitant des manipulations extrêmement précises ; la transformation des produits alimentaires (préparation de la nourriture) ; ou l'intervention en situation dangereuse (contamination dans une zone de l'habitat clos) ;
- le développement de robotique humanoïde (robotique bioinspirée, robots compagnons) ;
- le développement de robots mobiles simples ou de systèmes robotisés distribués (comme des colonies de microrobots dotés d'intelligence en essaim) utiles notamment pour l'expansion de la base martienne et capables : en effectuant collectivement l'autoassemblage de construction de structures à relativement grande échelle (en combinaison avec des imprimantes 3D produisant les composants structurels) ; ou en répliquant les comportements collectifs de populations d'insectes sociaux, dans le cadre de la construction collective de structures de l'habitat (Werfel et al. 2014).

9.3 Les technologies embarquées

Ce chapitre aborde les technologies embarquées qui pourraient s'avérer utiles dans la perspective des ECA, à savoir :

- le « smart monitoring » de données environnementales et de santé (§9.3.1) ;
- le « data mining » : vers une exploitation des données pertinentes pour l'homéostasie de l'ECA (§9.3.2) ;
- les sciences de l'interaction : vers des interfaces homme-machine conviviales et optimisées (§9.3.3) ;
- la cybersécurité : vers une collecte sécurisée des données vers le « cloud » numérique (§9.3.4).

9.3.1 Le « smart monitoring » de données environnementales et de santé

On l'a vu, une biosurveillance attentive est indispensable à la détection précoce de perturbations et à une régulation efficace de l'ECA (§8.2). Dès lors, un monitoring « intelligent » consiste à récolter ces données automatiquement, en continu et à distance, et à les exploiter et les interpréter de manière efficiente. Un tel « smart monitoring » de l'ECA fait appel à la microélectronique, et notamment aux microsystèmes électromécaniques, tels que des microsenseurs de type MEMS intégrés au système de support-vie.

Dans le cadre de la simulation d'ECA, les données récoltées par des capteurs peuvent être divisées en deux groupes principaux, avec d'une part les données environnementales (basée sur des paramètres physico-chimiques), et d'autre part celles sur la santé des organismes (basée sur des données biomédicales, principalement physiologiques).

Les deux prochaines sections listent les paramètres pouvant être monitorés ces deux types de senseurs et donnent des exemples de leur applications commerciales.

✧ *Les données environnementales basées sur la mesure de paramètres physico-chimiques*

- *Température, pression atmosphérique, et humidité ambiante* : surveillance des changements hygrothermiques dans un environnement contrôlé ;
- *Lumière ambiante* : intensité, durée et qualité de l'ensoleillement ou de l'illumination artificielle, identification de la longueur d'onde lumineuse ;
- *Qualité de l'air* : détection et mesure de concentration de gaz atmosphériques (CO₂, N₂, O₂), de gaz toxiques (NO_x, CO, SO₂), de gaz en trace (composés organiques volatils, hydrocarbures aromatiques polycycliques), de poussières et particules fines ;
- *Qualité de l'eau* : détection de particules, de contaminants, de microbes ;
- *Conditions de culture des (photo)bioréacteurs* : température, lumière, oxygène, pH,

conductivité, pression, turbidité, concentration de particules en suspension, etc.

- *Conditions de culture des chambres de cultures végétales* : température, lumière, oxygène, contenu des solutions nutritives, pression, etc. ;
- *Rayonnements électromagnétiques* : détermination de dose de radiations (UV, RX, ultrasons, rayonnements cosmiques, activités solaires, etc.) ;
- *Position GPS* (« géotagging ») : mesure de performances sportives (distance, vitesse), suivi précis des déplacements de l'équipage durant la réalisation de leurs tâches ;
- *Mouvements* (via des fonctions d'accéléromètre, ou de gyroscope, traitement de signaux audiovisuels) : nombre de pas, geste du corps ou mouvement des membres, études de paramètres psychologiques (évaluation de l'humeur) : expression du visage tel que battements de cils, sourires, froncements de sourcils, et des orientations du regard.

✧ *Les données sur la santé des organismes basées sur la mesure de paramètres biologiques ou physiologiques*

- *Poids* : mesure de l'indice de masse corporelle, de la répartition entre masse musculaire et masse grasseuse (par impédancemétrie) ;
- *Système cardiovasculaire* : mesure du rythme cardiaque par électrocardiogramme, de la tension artérielle, de taux sanguins de gaz (oxygène) ou de molécules (cholestérol, glycémie, caféine) ;
- *Système nerveux* : mesure du rythme circadien ou du cycle du sommeil par électroencéphalogramme ;
- *Système respiratoire* : mesure du seuil lactique (produite lors d'un exercice), détection de molécules expirées par le corps comme le CO₂, l'acétone, l'isoprène, l'ammoniac, etc. ;
- *Système gastro-intestinal* : mesure de la composition des excréments fécaux ;
- *Système urogénital* : mesure de la composition de l'urine, du liquide séminal, du sperme et des excréments vaginaux ;
- *Système endocrinien* : suivi de rythmes hormonaux ;
- *Système sensoriel* : évaluation de l'état de la peau, mesure de la conductivité électrique (de la peau), détection de molécules *perspirées* par le corps (présentes dans la sueur) comme l'acétone, l'isoprène, l'ammoniac, etc. (pour la détection de personnes ensevelies), températures en surface ou à l'intérieur du corps ;
- *Système moteur* : mesure de contraction musculaire.
- *Données issues des sciences omiques* : récolte d'échantillons cellulaires pour l'analyse de contenus génomiques, protéomiques ou métabolomiques humains, bactériens ou végétaux.

✧ *Les applications commerciales d'un smart monitoring : de la surveillance de la santé et de l'environnement au décryptage des émotions*

Les technologies embarquées sont aussi bien destinées à simplifier notre quotidien qu'à servir à des

applications à la pointe des technologies biomédicales. Comme évoqué au §6.4.1, elles ont aujourd'hui pour support aussi bien des vêtements, des montres, des bracelets et des lunettes, que des smartphones ou des équipements de l'habitat. Les domaines d'application du smart monitoring sont divers, multisectoriels et également déjà bien présents sur certains marchés de niches. Actuellement, on peut évoquer par exemple les utilisations terrestres suivantes :

- *Surveillance de la santé* : monitoring autonome ou à distance de signes vitaux, ou de l'état émotionnel de personnes âgées, convalescentes, malades ou handicapées, et d'enfants³¹⁵. Parmi les champs applicatifs, on peut signaler la possibilité d'alarmer les proches ou le corps médical, en cas de mesures potentiellement problématiques³¹⁶. Le §9.4 reviendra en plus de détails sur le potentiel de la télésanté dans le contexte des ECA ;
- *Sport* : de nos jours, il est difficile d'imaginer un alpiniste sans GPS ou un coureur d'élite qui ne mesure pas son rythme cardiaque durant l'effort, les technologies portatives et miniaturisées sont déjà fréquemment utilisées – et le seront toujours plus – dans le cadre d'applications sportives³¹⁷ ;
- *Surveillance de l'environnement* : le §7.3.3 sur le suivi de l'exposome dans un simulateur d'ECA et donne des exemples de données environnementales mesurées par un smart monitoring ;
- *Habitat intelligent* : sécurité, domotique (commande à distance) (voir §10.6).
- *Décryptage des émotions et mesures de sentiments*: monitoring de réactions physiologiques (transpiration, rythme cardiaque, etc.) et/ou émotionnelles (battements d'œil, expression du

³¹⁵ Afin d'illustrer une application commerciale concrète, citons, iBGStar® , produit par la société pharmaceutique Sanofi-Aventis, se positionne comme un lecteur de glycémie qui s'adapte au « rythme de vie des patients diabétiques ». Concrètement, l'appareil permet de déterminer la glycémie en quelques secondes après insertion d'une languette imbibée d'une gouttelette de sang. Les résultats sont transférés instantanément par connexion sans fil au smartphone du malade. Une « iApplication » (iBGStar® Diabetes Manager) permet ensuite d'établir un journal de santé (carnet de diabétique) qui l'aidera à surveiller l'évolution de son taux de glycémie. Cette « auto-gestion » de sa maladie permet au patient d'avoir accès en tout temps à ces données, et de les visualiser par le biais d'une interface conviviale et simple d'utilisation (puisque son utilisateur est déjà bien habitué à l'interface de son téléphone intelligent). Lorsque nécessaire, il pourra décider de – ou sera invité à – prendre contact avec des professionnels de la santé, en ayant la possibilité d'envoyer au préalable directement les résultats (graphiques, historiques) par courriel au médecin traitant, qui pourra décider dans la foulée s'il est pertinent d'effectuer des examens complémentaires, ou tout simplement effectuer des recommandations à distance.

³¹⁶ Des start-ups comme Lemn Micro Devices ont bien compris le potentiel de ce type de microcapteur non invasif et mesure des signes vitaux simplement en posant le doigt sur un smartphone durant quelques instants, ouvrant la voie à de nouveaux services de santé connectées et de téléassistance médicale. Lire à sujet l'article « Mesurer cinq signes vitaux en posant un doigt sur son smartphone », paru dans Le Temps du 03.12.2013: www.letemps.ch/Page/Uuid/0bc0a154-5b6c-11e3-83aa-2bd4ab4f3ef1#.UqB5FZGVzOQ

³¹⁷ Selon le Prof. Fabien Ohl directeur de l'Institut des sciences du sport de l'UNIL, « le sport véhicule l'idée que le corps peut toujours être amélioré par l'entraînement et des techniques ». Il cite par exemple les golfeurs qui se font opérer des yeux. Et de s'interroger sur les limites de l'amélioration de la performance : transformer les corps et avec quelles technologies soulèvent des considérations éthiques. Il poursuit : « [O]n améliorera l'homme par des prolongements, des appareillages que l'on fixe sur le corps, de la pharmacologie. Bientôt, on implantera des puces dans le corps des sportifs, des tee-shirts prendront des indicateurs biologiques, etc. Un grimpeur pourrait se faire renforcer les tendons par de la microchirurgie. Lire l'entretien du Prof. Ohl interrogé par Francine Zambano, paru dans l'Uniscopie n° 573 (2012) : www.unil.ch/webdav/site/unicom/shared/pdfs/fabien.pdf

visage, etc.), afin d'éviter des comportements à risques³¹⁸. Le §9.4.3.4 explorera le potentiel de telles applications pour la psychophysiologie de l'émotion et de la performance en conditions extrêmes.

Bien d'autres applications commerciales existent (ou semblent possibles), dont un nombre croissant qui se base sur le contexte de l'utilisateur (lieu, préférences personnelles, présence de connaissances de l'utilisateur à proximité, etc.).

Un des intérêts principaux d'Oikosmos dans le contexte des microsenseurs repose sur la combinaison d'un vaste nombre de ces capteurs pour le suivi de données physico-chimiques et biologiques d'une seule et même installation, hypermonitorée comme aucune autre : le simulateur d'ECA. La validation de l'utilisation de telles micropuces dans les conditions si particulières d'un habitat clos, ne manqueront pas de trouver des utilisations terrestres pertinentes, qu'elles soient nouvelles ou optimisées. De nombreuses technologies embarquées - parmi les plus émergentes - pourront être explorées, testées et mises au point dans le cadre de la simulation au sol d'une mission habitée vers Mars, et ainsi jouer un rôle prépondérant.

Le monitoring en temps réel des flux d'informations des ECA implique le design, le développement, le test et l'optimisation de systèmes d'information embarqués basés sur des instruments et dispositifs de détection intégrés, miniaturisés et intelligents (Young & J. P. Sutton 2017). Ces instrumentations biomédicales devraient idéalement être caractérisés par un maximum des propriétés suivantes :

- *une fiabilité élevée* : précision des mesures (mesure quantitative) ;
- *une autonomie d'envergure* : microsystèmes ultra basse consommation ;
- *une instantanéité d'utilisation* : relevés ne nécessitant ni calibrage, ni allumage avant utilisation ;
- *une facilité d'utilisation* : mesure non invasive, temps de formation limité, guidage intégré, gestion des données automatique ;
- *une réactivité élevée* : réponse en temps réel aux changements de l'environnement immédiat ;
- *une capacité d'interconnexion* : pour un monitoring distribué et une surveillance décentralisée ;
- *un échantillonnage automatisé* : avec des passeurs automatiques pour le prélèvement et/ou l'injection d'échantillons dans le système de détection ;
- *des systèmes de détection miniaturisés* : basés sur des micro- ou nanopuces (« system-on-chip ») ;

³¹⁸ À titre d'exemple, Faceshift, une start-up de l'EPFL rachetée par Apple à la fin 2015, développe une technologie qui capte les émotions du visage en temps réel, à l'aide d'une caméra. Les animations faciales réalistes sont utilisées surtout dans le cadre de l'industrie des loisirs, ou alors pour des séances des chats vidéos 3D avec des avatars. Voir l'article du magazine Tech Crunch : <https://techcrunch.com/2015/11/24/apple-faceshift/> (dernière consultation : 02.01.2016)

- *une haute sélectivité* : seuils de détection élevés ;
- *une haute modularité et un multisensing* : mesure simultanée de plusieurs paramètres ;
- *une adéquation à des environnements aux ressources limitées* : une robustesse des composants, composants réutilisables ; minimisation de la masse, du volume et des consommables ; utilisation de matériaux et de fluides non toxiques
- *une interopérabilité* : via des interfaces de programmation (API) ;
- *une facilité de maintenance* : calibration et recharge aisée, réparabilité des composants.

Ultimement, il serait souhaitable qu'Oikosmos permette la conception de systèmes microélectromécaniques « verts », basés sur des procédés de microfabrication permettant d'effectuer une dématérialisation couplée à une décarbonisation sur l'ensemble de leur cycle de vie, en particulier via : une microélectronique embarquée de faible consommation (y compris en mode veille) dotée de circuits intégrés haute performance (ASIC) ou de récupérateurs piézoélectriques ; de systèmes informatiques à faible consommation : protocoles et algorithmes de récolte, de transmission, de traitement et de visualisation des données ; autonomie de fonctionnement (production de leur propre courant, à partir des rayons solaires, des changements de température, des ondes électromagnétiques ou des mouvements du corps) ; la sélection de composants ou d'éléments peu ou non toxiques, facilement recyclables.

Un simulateur d'ECA pourrait s'avérer intéressant pour le développement de biosenseurs, incorporant un matériel biologique (tissu cellulaire, micro-organismes, organelles, récepteurs cellulaires, enzymes, anticorps, acides nucléiques, etc.) ou un matériel dérivé de molécules biologiques, à savoir des équipements d'analyse capables de détecter précoces des métabolites difficilement mesurables via des techniques conventionnelles, et intimement associés avec à un microsystème physico-chimique et permettant une mesure quantitative par transduction d'un signal optique (bioluminescence, chémiluminescence), électrochimique, thermique, piézoélectrique ou encore magnétique.

Voyons à présent en plus de détails comment interpréter cette richesse de données environnementales et biologiques dans la perspective des ECA.

9.3.2 Le « data mining » : vers une exploitation des données pertinentes pour l'homéostasie de l'ECA

Conséquence de leur multiplication, nous sommes bel et bien entrés dans ce qu'on appelle communément l'ère du « Big Data », celles des données produites en masse. Les ECA ne sont pas en reste et produisent également un « déluge de données » à leur échelle, compte tenu de leur relativement faible dimension et du nombre peu élevé d'organismes en présence. Un des enjeux consiste donc à

pouvoir gérer les flux d'information de l'ECA, de sorte à pouvoir exploiter adéquatement les données récoltées par les senseurs, les caméras et les moyens informatiques utilisés. Alors que les outils traditionnels ne sont souvent pas capables d'exploiter pleinement le potentiel de ces données, il s'agit de pouvoir les agréger, les interpréter de manière précise, ciblée, fiable, efficace, efficiente et rapide, qui plus est de manière personnalisable et paramétrable en fonction des conditions en présence. Pour les exploiter à bon escient, cette exploration des données produites en masse nécessite l'utilisation des sciences computationnelles (§9.2). Ce « data mining » a bien entendu pour objectif final l'obtention d'informations pertinentes sur l'état de fonctionnement de l'ECA dans son ensemble. Il s'intéresse premièrement à l'état de santé des organismes de l'ECA, aux conditions ambiantes (exposome) et à la détection précoce des diverses perturbations pouvant frapper l'écosystème, mais également aux activités de maintenance des équipements du système de support-vie, du hardware informatique, des installations de télécommunications et de l'ensemble des infrastructures de l'habitat clos.

À la fois minutieux et dynamique, un traitement de l'information en temps réel est indispensable pour maintenir l'homéostasie de l'ECA (§7.3.4). De par la surveillance minute par minute des organismes et des conditions de l'environnement, un démonstrateur d'ECA pourrait se profiler comme l'installation ultime de « lifelogging », chers aux adeptes de la quantification de soi (voir §6.4.2)³¹⁹. L'intérêt d'un simulateur d'ECA consiste en particulier à la recherche systématique de moyens de valoriser l'autobiographie des activités, des expositions et de leurs effets sur les organismes par l'intermédiaire de capteurs collectant les données cruciales pour les opérations de l'ECA, mais aussi non essentielles valorisables dans un deuxième temps, même à l'issue d'une campagne de simulation.

Le programme Oïkosmos devrait participer activement :

- au développement d'outils informatiques (basés sur les sciences computationnelles, mais pas uniquement) permettant la recherche d'information, ainsi que l'agrégation, l'exploration, l'analyse et l'interprétation et la compilation de données produites en masse, afin de découvrir des motifs significatifs et des règles, à même d'être intégrés dans des études complexes et de comparer et de cartographier les résultats avec des valeurs moyennes (aspect quantitatif) ou de suggérer des seuils de tolérance (aspects qualitatifs) ;
- à l'amélioration la « productivité » des résultats via : le développement de méthodes statistiques pour l'analyse de données en masse ; le développement de procédures de normalisation des mesures permettant de combiner des données hétérogènes objectives (distances parcourues, pouls) ou subjectives (humeur, alimentation) ;

³¹⁹ Ces derniers enregistrent et archivent très régulièrement un nombre élevé d'informations décrivant leur vie, à l'image de paramètres biologiques, de notes écrites, audios et/ou vidéos décrivant leur état physiologique, leurs humeurs, leurs émotions ou encore leur alimentation. Ces données peuvent ensuite être utilisées, contrôlées et partagées selon des degrés divers. Voir l'article « Lifelogging, An Inevitability », consulté le 07.06.2012 sur le site www.kk.org/thetechnium/archives/2007/02/lifelogging_an.php

- la maîtrise de la gestion documentaire par l'établissement d'un catalogue exhaustif des données existantes exploitables et composées notamment de données : expérimentales (protocoles scientifiques, comptes rendus expérimentaux), médicales (analyses sanguines, ECG, EEG) environnementales (exposome), biologiques (génomomes, protéomes et métabolomes des organismes), opérationnelles (rapport de maintenance), organisationnelles (procès-verbaux des séances de l'équipage, contacts avec l'assistance au sol, résultats de tests de performance, enregistrements audio et vidéos divers) ;
- l'évaluation de la disponibilité des données, des modalités d'accès, de collecte et de stockage, de leur format, des modalités et de leurs lieux de stockage ;
- l'établissement des procédures pour cataloguer les métadonnées (balises, mots-clés, etc.), de numériser les données, afin d'améliorer l'exploitabilité des données récoltées.

À terme, les ECA pourraient ainsi devenir des « écosystèmes modèles » pour collecter et exploiter adéquatement de déluge de données omiques relatif aux flux d'informations environnementales et biologiques.

9.3.3 Les sciences de l'interaction : vers des interfaces homme-machine conviviales et optimisées

La généralisation des NTIC a permis la mise en place d'une informatique mobile et ubiquitaire. En parallèle, les puissances de calcul ont connu une ascension fulgurante. Ce qui était impossible il y a vingt ans est faisable aujourd'hui et pourrait être trivial dans vingt ans. L'avènement des smartphones, tablettes et autres interfaces numériques a été couplé au développement d'un éventail de près d'un million d'« iApplications », rien qu'en combinant l'*App Store* et l'*Android market*, les supermarchés respectivement d'*Apple* et de *Google*. Et ce en à peine une dizaine d'années ! En 2016, de plus en plus d'entreprises proposent des services basés sur la récolte de données personnelles ou professionnelles de l'utilisateur.

Les enjeux liés aux modalités de tri, d'agrégation, de vulgarisation et de partage des montagnes d'information nécessitent des interfaces adéquates pour être correctement exploités, que ce soit en amont pour la saisie des données, ou en aval pour les consulter. Élément central et de toute « interaction homme-machine », une interface utilisateur réussie doit être conviviale et fournir des interactions riches et dynamiques entre l'utilisateur et le contenu qu'il consulte par le biais de supports variés et généralement – mais pas uniquement – numériques. L'« expérience utilisateur » fait quant à elle référence au ressenti de l'utilisateur lorsqu'il interagit avec une interface homme-machine, lors d'une utilisation ponctuelle ou récurrente. Proche du concept d'« utilisabilité », elle englobe des critères ergonomiques (liés à la

forme, au design et aux modalités d'emploi de l'appareil, et dans une moindre mesure au contenu visualisé) ou techniques (liés à la rapidité, la réactivité et à la performance de l'interface). Mais la notion va plus loin, car elle intègre également la dimension émotionnelle vécue par l'utilisateur, qui vise ce que l'interaction procure une expérience agréable. L'interaction doit être efficace et accessible, au sens où l'information reçue doit pouvoir être comprise et exploitable par l'utilisateur, et satisfaire ses attentes. L'intégration des aspects affectifs est amplifiée par la généralisation sur d'interfaces tactiles sur de multiples marchés, de solutions de reconnaissance vocale (smartphones, télécommandes, ordinateurs, etc.), mais aussi de détecteurs des gestes de l'utilisateur (jeux vidéo, télécommandes nouvelles générations), de ses mouvements d'yeux (smartphones) ou encore de ses mouvements de membres (fonction podomètre ou de traqueur d'activité). Ces fonctionnalités permettent de mieux manipuler ces appareils électroniques. La compatibilité interappareil est de plus en plus répandue et favorise la création d'un écosystème d'équipements via des API (« application programming interface »)³²⁰.

Il s'agit également d'épurer les interfaces, ces dernières étant consultées quotidiennement plusieurs dizaines voire centaines de fois par l'utilisateur. Concrètement, l'optimisation des interfaces a pour objectif de faire gagner du temps à l'utilisateur tout en améliorant le confort d'utilisation. Cela consiste à les simplifier, à faciliter l'entrée des données, à proposer des fonctions de remplissage automatique en fonction du contexte d'utilisation (lieu, heure, etc.) à devoir entrer un nombre raisonnable de paramètres pour une action donnée. Puis, le contenu saisi ou récolté automatiquement doit être filtré, agrégé et interprété correctement, et permettre un rendu aussi explicite que possible. Les interfaces fonctionnelles aident ainsi les utilisateurs à prendre de bonnes décisions dans les meilleurs délais. L'enjeu est de rendre l'interface ergonomique et facile d'utilisation, afin que de faire fonctionner correctement (sans se tromper) et efficacement (sans perdre de temps) les équipements de toute sorte. Les domaines d'application terrestres sont nombreux et intersectoriels, et incluent par exemple le design d'interface numérique, ainsi que le « marketing relationnel ». À présent, nombre d'industries désirent proposer des services censés améliorer les interactions entre l'homme et son environnement, dans ces activités quotidiennes et professionnelles.

En habitat clos, les interfaces restent un moyen essentiel au déploiement des activités de l'équipage en détaillant les protocoles expérimentaux, en proposant les mesures correctives en cas d'erreur d'utilisation ou en aiguillant les choix, en particulier en cas de défaillance opérationnelle. Dans de telles situations, les contre-mesures doivent être mises en œuvre sans attendre. Dans cette perspective, il est évident que clarté, et efficacité sont indispensables pour que l'ECA puisse pleinement remplir ses

³²⁰ S'il est intéressant de piloter plusieurs application à distance et de proposer des services utilisant une plateforme unique, le véritable enjeu réside dans leur capacité à « dialoguer » entre eux — même de façon simple —, afin de tirer parti de leur potentiel cumulé. Ce sont donc bien de telles interactions multidirectionnelles qui rendront les appareils réellement « intelligents ». Comme l'a déclaré Marc Whitten, de la division Xbox Live Online Entertainment Service, « Vos appareils ne sont pas si intelligents (« smart ») car ils ne marchent pas ensemble », lors d'une conférence de presse au Salon E3 (l'Electronic Entertainment Expo) à Los Angeles en 2012.

fonctions de support-vie. Une expérience utilisateur satisfaisante dépendra de la convivialité des interfaces pour la réalisation des expériences scientifiques, la préparation de la nourriture ou les loisirs basés sur le numérique. Grâce à une ingénierie informatique et communicationnelle bien réfléchie, le traitement de l'information par ordinateur devra rendre l'information facilement interprétable et permettre une visualisation optimale des résultats, afin que ceux-ci soient facilement exploitables.

Le projet de partenaire électronique « Mission Execution Crew Assistant » (MECA)³²¹ exemplifie l'approche de l'ESA dans les interactions homme-machine. Une mission d'exploration planétaire implique que les astronautes collaborent et interagissent avec un équipement et des installations informatiques complexes et extrêmement variés: les habitats, les serres, les centrales énergétiques, les véhicules d'exploration, les robots autonomes, etc. L'objectif de MECA est de renforcer les capacités cognitives (perception et conscience de la situation) d'équipes homme-machine afin de faire face de manière autonome à l'inattendu, aux situations complexes et potentiellement dangereuses. Il s'agit donc d'offrir des systèmes d'aide à la décision appropriés aux membres de l'équipage, afin qu'ils fassent des choix adéquats, résolvent des problèmes et se préservent d'échecs majeurs potentiels (dont certains peuvent entraîner la mort de l'eux) (Tavana 2004). La simulation Mars500 (§4.2.2.1.c) a permis le test de prototype de MECA, afin de démontrer un comportement mutuellement adaptatif d'interaction homme-machine. L'application de technologies émergentes cherche à optimiser la performance ou à permettre une planification automatique de la charge de travail requise, ainsi qu'à fournir des outils efficaces de management de la santé.

Dans le contexte particulier des ECA, l'amélioration de la perception peut servir d'outil de relaxation pour lutter contre le stress et la monotonie, aussi bien pour la préparation et l'entraînement de l'équipage que lors de la mission effective. La réalité augmentée se situe à la confluence homme-ordinateur et vise à rapprocher perception naturelle et artificielle. En outre, elle peut permettre à l'équipage d'interagir avec ses proches et l'assistance au sol de la manière la plus réaliste possible. Dans le cadre des activités sportives ou de loisirs, la réalité augmentée présente également l'intérêt de pouvoir plonger le membre de l'équipage en immersion dans un environnement terrestre virtuel. Lorsqu'il s'entraîne ou se détend, la possibilité de retranscrire des situations terriennes sur les murs (par des projections d'images ou de vidéos, couplées à la diffusion d'odeurs et de sons de la nature) aura un effet bénéfique sur le moral et la motivation, faisant office de contre-mesure pour des personnes coupées de perception environnementale terrienne durant des périodes prolongées. Le géant EADS a par exemple développé un « Relaxcycle »³²², un vélo d'appartement « amélioré », combinant des lunettes de réalité augmentée et des gants dotés de multisenseurs, ainsi qu'un système de tracking des mouvements multicaméra. Cette

³²¹ Site web de MECA : www.crewassistant.com

³²² Voir la présentation du Relaxcycle d'EADS Innovation Works disponible sur : www.dlr.de/envihab/Portaldata/72/Resources/dokumente/Olbert.pdf

« bicyclette de relaxation » retranscrit instantanément les mouvements du cycliste, la vitesse et la résistance du vélo selon les configurations topographiques choisies. Cette réalité virtuelle immerge l'utilisateur dans un environnement en rupture avec celui de l'habitat clos. Le dispositif produit en outre des sons (tels que chants d'oiseaux, bruits de vagues, etc.) et peut créer des interfaces multi-utilisateurs et offre l'opportunité de simuler nombre d'environnements terrestres et d'intégrer des situations d'entraînement spécifiques. Cela rentabilise – et dématérialise – en quelque sorte le rapport volume/effet de telles technologies. Il s'agit de trouver le bon compromis permettant de minimiser le hardware tout en maximisant la plus-value de l'immersion en réalité virtuelle.

Il est également possible de simuler les conditions de la mission (navette, base planétaire, serre martienne) dans les conditions les plus réalistes possibles par le biais de telles technologies, via des interfaces informatiques dynamiques et intelligentes. Fer de lance de l'Italian Mars Society, un projet de réalité virtuelle³²³ de la station ERAS (European MaRs Analogue Station for Advanced Technologies Integration) a justement proposé un habitat permettant de se mettre en immersion dans les conditions de l'environnement martien.

Autre piste pour améliorer l'expérience utilisateur en habitat clos, l'information sensorielle « augmentée » cherche à stimuler visuellement, olfactivement, gustativement, auditivement et tactilement procurant une perception accrue de l'environnement artificiel. Ces senseurs artificiels offrent de nouvelles capacités comme la vision infrarouge pour l'orientation et la navigation dans des lieux inhabituels, des conditions nocturnes ou basée sur la superposition d'images réelles et thermographiques, avec des applications dans l'imagerie biomédicale (monitoring de l'irrigation sanguine). D'autres domaines d'application permettent un sensing chimique : à l'image de langue ou de nez électronique capable de détecter la composition de solutions aqueuses grâce à une sensibilité aux ions métalliques. Plus surprenante, une interface homme-machine pourrait consister en un « ami numérique » pour chaque occupant de l'habitat clos, afin de lutter contre l'ennui ou d'offrir un support opérationnel, voire une certaine forme de soutien psychologique complémentaire à l'assistance au sol.

En parallèle, des « interactions machines » (« machine-to-machine », M2M en anglais) permettront d'échanger facilement des informations entre périphériques à courte distance (sans fil) par des technologies de communication en champ proche (« near field communication », NFC), de mémoriser ou de récupérer des données à distance par le biais de « radio-étiquettes » (ou « RFID tag »).

Dans le cadre d'Oïkosmos, les synergies liées au design et à l'optimisation des interfaces homme-machine englobent :

- l'optimisation du fonctionnement et l'amélioration des interfaces utilisateurs (ergonomie, facilité d'utilisation, expérience utilisateur agréable) : convivialité des équipements de l'ECA

³²³ Site web du projet V-ERAS : <http://erasproject.org> (dernière consultation : 16 mars 2015).

et des installations de l'habitat (bioréacteurs, serres, centrales énergétiques, etc.), des appareils de surveillance et de contrôle associés, ainsi que d'éventuels robots et des véhicules pour la simulation des sorties, etc. ; développement d'une interface unifiée des équipements de l'ECA (ordinateur, tablette, tableau de bord, etc.) ;

- le développement de nouvelles technologies interactives : interactions homme-machine basées sur la reconnaissance de mouvements (yeux, gestes), ainsi que sur la reconnaissance tactile (interfaces haptiques) ou vocale ; systèmes de reconnaissance biométrique (reconnaissance faciale, rétinienne, vocale, digitale (empreinte, système veineux), etc.) ou de reconnaissance des émotions ; interactions entre machines (M2M) basées sur technologies similaires aux NFC et RFID ; interfaces de visualisation de l'information (aide à la décision) : représentation, structuration, agrégation de données hétérogènes, en résultats facilement exploitables ; données contextualisées (basées sur la temporalité, son lieu d'utilisation, comportement, etc.) ;
- réalité augmentée / réalité virtuelle / perception augmentée : développement de services de visioconférence et de téléprésence de nouvelle génération (vision 3D « fly-through », vue-multiples et écrans holographiques) et de technologies immersives (logiciels et hardware) permettant la retranscription d'environnements terrestres ou martiens virtuels, par des moyens audiovisuels, olfactifs ou tactiles : simulation d'environnements naturels (déplacement en forêt, en ville, etc.) ; « fenêtres virtuelles » (aquariums, paysages de montagne, environnements urbains, etc.) ; protocoles d'entraînements et d'exercices de relaxation.

9.3.4 La cybersécurité : vers une collecte sécurisée des données vers le « cloud » numérique

Dans le cadre de l'utilisation des NTIC, il paraît essentiel de s'assurer que les données collectées numériquement ne soient pas exposées à des risques de manipulation, de piratage ou de perte de données, tout au long des étapes de leur transport, de leur traitement et de leur stockage. Ce point est bien entendu déterminant pour des informations sensibles comme des données privées médicales ou bancaires, mais aussi professionnelles, notamment au vu de leur valeur commerciale potentielle³²⁴. La possibilité de récupérer facilement au quotidien des données sur la santé des personnes représente un facteur expliquant le succès fulgurant des capteurs et applications de smart monitoring basé sur l'utilisation de NTIC, notamment celles mesurant des paramètres liés à notre système cardiorespiratoire, notre sommeil, nos maladies, voire à nos émotions. Or, la sécurité et la confidentialité de l'utilisation et du stockage des

³²⁴ Les données sur la santé peuvent par exemple intéresser banques, assurance et employeurs. Il est ainsi tout à fait possible d'imaginer que les informations sur les prédispositions génétiques d'un individu de développer une maladie chronique risqueraient d'aboutir à l'exclusion d'une couverture de son traitement dans les polices d'assurance-vie, si son émetteur devait se trouver en leur possession. Un tel contexte implique de protéger la vie privée des utilisateurs, en maîtrisant la confidentialité de ses données récoltées à distance et d'empêcher leur accès non autorisé.

données méticuleusement archivées au quotidien par ces solutions ne sont pas toujours garanties, et certaines sont communiquées parfois sans que l'utilisateur en soit conscient.

D'un point de vue éthique, ces systèmes de collecte automatique et quasi permanente de données soulèvent ainsi une véritable question de société. Les enjeux de sécurité liés à la communication d'informations très personnelles, intimes et sensibles (comportements, émotions, maladies) capturées par les senseurs environnementaux ou biomédicaux pourraient s'avérer un frein, voire un facteur bloquant pour nombre d'utilisateurs. Il paraît impératif de garantir autant que possible à terme qu'il ne puisse pas y avoir d'intrusions aisées dans les applications embarquées³²⁵.

Quelles que soient les modalités exactes de télécommunications qu'elles emploient, les missions Mars nécessiteront gestion sécurisée des données du début des préparatifs aux dernières phases de leur accomplissement. Il en va notamment de l'acceptation par les futurs potentiels utilisateurs des retombées terrestres de tels développements technologiques. Dans le contexte des missions Mars, l'infrastructure hardware et software pourra être gérés ou dédoublés depuis des serveurs informatiques terrestres. Dans le cadre d'Oikosmos, le concept de « cloud » numérique permet de dématérialiser partiellement le hardware informatique du simulateur d'ECA, de la navette ou de la base martienne, avec les économies énergétiques en découlant³²⁶. Le programme Oikosmos devrait pouvoir bénéficier de synergies de recherche liées à la gestion sécurisée et à distance de l'énorme volume d'information généré par le pilotage et de la surveillance des ECA, ainsi que par les télécommunications entre le simulateur et les supports informatiques au sol.

Les thématiques et sujets de recherche associés portent par exemple sur le développement de centre de données à distance (au sol) dotées de serveurs informatiques (cloud computing) et de systèmes de gestion de bases de données dont l'architecture informatique et les systèmes intégrés : font appel à des solutions de cryptage de données maximisant la sécurité informatique pour l'ensemble du hardware et du software informatique dédiés au stockage des données numériques ; optimisent les procédures de synchronisation ; facilitent le transfert de données à partir des réseaux de senseurs (sans fil) des ECA.

³²⁵ Exemple extrême et de plus en plus fréquent, les technologies embarquées deviennent la cible de « hackers » mal intentionnés. Le risque de « hacking » de ces applications est encore relativement faible, mais réel. La prise de commande des boîtiers électroniques pilotant les voitures est un exemple classique. Deux chercheurs américains en sécurité l'ont encore démontré en « crackant » les logiciels permettant de freiner, d'accélérer ou de faire tourner le volant de modèle de Toyota ou de Ford. Cette recherche, partiellement financée par le gouvernement US (via la Defense Advanced Research Projects Agency) visait à donner l'alerte sur des « bugs » de programmation de l'électronique embarquée facilitant sa prise de contrôle par un PC, certes en l'occurrence connecté directement à la voiture, mais un piratage sans fil est envisageable à terme. Elle a mené à la publication d'un plan détaillé des techniques de hacking des véhicules automobiles à l'attention des constructeurs. Une autre cible est celle des pacemakers et des dispositifs de distribution de médicaments insérés directement dans le corps des patients, qui pourrait être utilisée à des fins criminelles. Voir l'article « Software experts attack cars, to release code as hackers meet » paru sur Reuters le 28.07.2013 : www.reuters.com/article/2013/07/28/net-us-hackers-cars-idUSBRE96R06120130728

³²⁶ En plein essor ces dernières années, cette informatique « dans le nuage » (ou « cloud computing ») consiste à héberger des données sur des serveurs distants. Le cloud numérique est une évolution du Saas (« software as a service ») et de la virtualisation (plusieurs systèmes d'exploitation sur un ordinateur, afin d'amortir les investissements et optimiser son utilisation). On assiste en quelque sorte à une prise de pouvoir du software sur le hardware.

9.4 La télésanté

9.4.1 Vers une prolongation de la vie à domicile en bonne santé grâce à la télésanté

La télésanté est une application des technologies de l'information et de la communication (TIC)³²⁷ aux domaines de la santé et aux pratiques médicales. Également appelée, « e-santé » (ou « eHealth » en anglais), le terme désigne l'ensemble des technologies et services pour les soins médicaux basés sur une exploitation des TIC par les métiers de la santé. Ainsi, la notion de télésanté englobe aussi bien une simple vidéoconférence d'un médecin avec son patient, que le transfert et l'analyse de données médicales et la réalisation d'actes médicaux à distance, comme une intervention chirurgicale robotisée opérée à grande distance du patient.

En Europe, force est de constater qu'un nombre croissant de personnes âgées souhaite rester le plus longtemps possibles à domicile (§6.1.1). En parallèle, il devient difficile de maintenir des prestations de soins adéquats dans les zones rurales, en raison de la réduction du nombre de médecins actifs - en particulier de généralistes - dans ces régions moins denses que les villes. Sans compter les personnes qui habitent des lieux isolés géographiquement, éloignés ou quasiment inaccessibles, ou alors bénéficiant de moyens de communication restreints. La télésanté et ses multitudes de services médicaux et prestations de soins permettent de mettre en contact les professionnels de la santé avec un patient, afin de contribuer à son bien-être sans qu'il ait forcément à quitter son domicile.

Dans un contexte de vieillissement de la société, un gain d'autonomie pourrait s'avérer crucial pour des personnes âgées, convalescentes, ou atteintes d'une maladie chronique, qui nécessitent un suivi et un soutien médical régulier et pour qui la généralisation des technologies de télésanté pourrait les aider à prolonger leur vie à domicile, leur habitat personnel étant souvent leur lieu préféré.

Relevons que la télésanté ne cherche pas à remplacer les indispensables contrôles médicaux en présence, mais vise plutôt à les compléter avec un nombre adéquat de « téléinterventions ». En outre, il ne s'agit pas de diminuer trop fortement des contacts personnels avec les professionnels de la santé, car un manque de relations directes pourrait ralentir l'appropriation des services de télésanté par la population, alors que leurs bénéfices ne sont pas toujours perçus par tous les acteurs impliqués³²⁸. Pourtant les

³²⁷ La télésanté représente un des éléments clés du « web symbiotique » décrit par Joël de Rosnay, qui a récemment été élu « Personnalité numérique de l'année 2012 » par l'association de l'économie numérique française (ACSEL) : www.associationeconomie numerique.fr/blog/2012/04/12/palmares-de-la-3eme-edition-des-acsel-du-numerique-allocine-ucpa-ina-2-personnalites-numeriques-joel-de-rosnay-gabrielle-gauthey/#more-12071

³²⁸ Parmi les enjeux actuels du domaine de l'« e-santé », selon un rapport du Conseil stratégique des industries de santé française (2013) : « La télésanté, qui inclut la télé médecine, mais ne se réduit pas à elle, constitue un secteur émergent. Jugé prometteur du fait de phénomènes démographiques et de santé publique, ce secteur intéresse un grand nombre d'acteurs économiques : industries spécialisées ou généralistes, prestataires de services ou encore du secteur assurantiel. [...] Par ailleurs, la télésanté est porteuse de promesses au-delà du médical et vis-à-vis d'un public large : le citoyen, le malade, le professionnel de terrain. Or ces acteurs sont aujourd'hui souvent ignorants de ce qui est susceptible de leur bénéficier au travers de la filière – même dans le domaine prioritaire du grand âge, auquel la télésanté ne se réduit pas. Il s'en suit une quasi-absence de demande solvable à ce niveau, alors même que des produits librement distribués (Wii fit, applications mobiles, sites privés santé, etc.) rencontrent

avantages potentiels des pratiques de télésanté sont multiples, tant au niveau :

- de la santé du patient : amélioration de la qualité et de l'efficacité des traitements, retour au travail accéléré du patient, etc. ;
- de la prise en charge : réduction du taux d'hospitalisation et de la durée des séjours, réduction du temps de consultation, etc. ;
- des coûts : réduction effective des coûts (compensation des coûts de télémonitoring et de téléassistance), meilleure efficacité globale des coûts, etc.

Les enjeux non économiques de la télésanté ne doivent également pas être sous-estimés, résident en particulier dans l'intégration réussie de ces nouvelles activités dans le cahier des charges déjà bien rempli des professionnels de la santé, ainsi que dans la sécurité, la confidentialité et la protection des données électroniques médicales du patient³²⁹.

Malgré tout, le déploiement massif des services de télésanté suscite ainsi de grandes attentes, et la pénétration progressive dans le quotidien des Européens devrait s'accélérer ses prochaines années³³⁰. Avec la digitalisation croissante de la société, il ira de soi pour les futurs seniors de consulter leur médecin sur le web et de suivre des recommandations personnalisées basées sur des données récoltées par des appareils de santé et des applications mobiles (mobile health ou mHealth) qu'ils se seront procurées et qu'ils auront configurées eux-mêmes (PwC 2016).

Les services de télésanté se situent à la convergence des métiers de la santé, des technologies médicales et des (N)TIC, et couvrent de multiples domaines allant du diagnostic au traitement (préventif, curatif, palliatif), en passant par la recherche et à la formation. Ces technologies et services pour des soins médicaux à distance favorisant l'autonomie sont discutés ci-après : les prestations pouvant être regroupées de la manière suivante : téléconsultation médicale ; télésurveillance médicale ; télétransmission de données électroniques biomédicales ; téléassistance médicale ; téléformation ; et télépsychiatrie.

des succès remarquables. »

³²⁹ Nombre de patients appréhendent que d'autres médecins, mais également d'autres personnes comme les informaticiens, aient la possibilité de consulter leur dossier, sans parler des craintes de vol de données, à l'insu du patient et du personnel soignant (voir §9.3.4).

³³⁰ Selon une publication sur la e-santé de la Commission européenne (2009), il s'agit d'un « marché avec un fort potentiel de croissance, qui pèse environ 20 milliards d'euros au niveau européen, ce qui le porte au troisième rang des marchés de la santé. (...) Les attentes [envers la télésanté] sont multiples : face au défi démographique, la possibilité d'assurer un meilleur suivi des personnes âgées, généralement atteintes de maladies chroniques, et de réduire les coûts (ceux des maladies chroniques représentent près de 60 % du montant total des dépenses de santé) ; pour renforcer la sécurité du patient, d'assurer aux professionnels de santé l'accès à l'information concernant les patients, où qu'ils se trouvent en Europe ; d'offrir des outils de support à la médecine préventive et proactive ; de faciliter la personnalisation des traitements, et donc d'améliorer leur impact ; de contribuer à donner au patient un rôle d'acteur dans la gestion de sa santé. »

❖ *La téléconsultation médicale*

La téléconsultation médicale permet au patient d'interagir avec un personnel de soins à distance. Si les personnes âgées ou chroniquement malades sont une cible privilégiée, elle offre un vaste champ d'applications, comme le suivi post-accouchement de mères et de leur nourrisson par une sage-femme ou un obstétricien, en alternance avec des visites à domicile. Comme « hotlines santé » audiovisuelles, les téléconsultations peuvent participer dans une certaine mesure au désengorgement des services d'urgences des grands hôpitaux, en permettant par exemple de mieux filtrer et prioriser les prises en charge relevant de la « bobologie » et d'identifier des personnes certes potentiellement souffrantes, mais ne nécessitant pas une examination ou une intervention immédiate. Signalons qu'à terme, les pratiques de télésanté ne devront pas nécessairement être accomplies depuis son domicile, avec la mise à disposition de bornes de télésanté à disposition pour des populations vivant dans des lieux isolés, et qui offriraient des services de télémédecine de base, comme la mesure de taux de molécules à partir d'échantillons de liquides corporels (gouttelettes de sang, échantillon d'urine, etc.) que l'utilisateur pourra soumettre directement dans ce cas précis via un détecteur robuste. D'autres installations pourront également servir de permanence de soins basés essentiellement sur l'imagerie. Autre forme de téléconsultation à présent courante, la « téléexpertise médicale » consiste à permettre à un professionnel de la santé de solliciter à distance l'avis d'un collègue ou d'un spécialiste pour des informations médicales spécifiques. À titre d'exemple, l'interprétation d'images radiologiques à distance à de fins diagnostics (radiographies, reconstitutions 3D de parties du corps, etc.) permet au patient et au médecin prescripteur d'avoir plus rapidement l'avis de plusieurs spécialistes.

Comme évoqué précédemment, la télésanté peut aider à prolonger la vie au domicile. Les usagers des habitats connectés de demain bénéficieront de dispositifs de télésanté dotés d'interfaces utilisateurs ergonomiques (comme celles détaillées au §9.3.3) pour communiquer avec leur médecin de famille, un médecin traitant, ou un infirmier, leur permettant selon les contextes d'utilisation non seulement de diagnostiquer ou de suivre d'éventuels problèmes de santé, mais aussi de prévenir les isolations sociales.

Dans le cadre d'Oïkosmos, lors de campagne de simulation ou d'une mission d'exploration, les requêtes des membres de l'équipage avec le personnel au sol en lien avec des thématiques biomédicales relèveront à la fois de la téléconsultation pour diagnostiquer un éventuel problème de santé, et de la téléexpertise lorsqu'il s'agira d'explorer des aspects biomédicaux spécifiques aux opérations de l'ECA ou de l'habitat clos.

❖ *La télésurveillance médicale*

À sa plus simple expression, la télésurveillance médicale permet un suivi médical à distance basé sur des téléalarmes au domicile de personnes âgées, convalescentes ou de malades chroniques présentant une fonction vitale défaillante qui peuvent les actionner en cas de malaise, afin d'avertir un centre de

télesanté. Une télésurveillance plus évoluée, reposant sur l'observation à distance du corps et de ses éventuelles affections, doit être à même de fournir une aide au diagnostic qui peut mener à une prise de décision en faveur d'une intervention ou d'un acte de télémédecine. Dans de tels cas de figure, elle repose sur la récolte de données entrées ou relevées directement par le patient via des équipements présents chez lui (relevé de rythme cardiaque et de pression sanguine, image d'une affection dermatologique prise soi-même, mesure du taux de glycémie, etc.) qui seront transmises directement à un centre de télesanté.

La télésurveillance offre un vaste éventail d'opportunités de télémédecine, allant du suivi d'une guérison ou de la cicatrisation d'une blessure, à la mesure biomarqueurs (sanguins, urinaires, salivaires) à l'aide de senseurs avancés, en passant par la télédétection de chutes via des capteurs de mouvement (§9.3). Elle va plus loin lorsqu'elle permet un monitoring régulier de valeurs physiologiques au domicile de personnes portant des dispositifs médicaux basés sur des microsenseurs intégrés à des vêtements, des bracelets ou des montres connectées. Ce télémonitoring est couplable à des systèmes d'alerte qui avertissent l'utilisateur, via une application qui peut envoyer une notification à lui ou à ses proches, voire à une centrale qui peut le contacter pour vérifier si un risque vital est en jeu et déclencher si nécessaire une intervention chez lui. En situation normale, les données relevées sont archivées pour être analysées de manière approfondie en temps voulu.

La télésurveillance a joué un rôle de moteur du développement d'équipements et d'outils mobiles de mHealth basés sur l'usage des données de santé et des nouvelles TIC. Le concept de mHealth cherche notamment à améliorer l'autonomie de patients à domicile via des dispositifs mesurant des biomarqueurs depuis leur domicile et souvent basés sur des applications en vue de suivre leur état de santé, mais aussi pour présenter ses données à des professionnels de la santé. À titre d'exemple, le domaine émergent de l'« informatique vestimentaire » développe des applications mobiles et flexibles miniaturisées, intégrées à des textiles ou des vêtements intelligents, par exemple via des capteurs non invasifs dotés de propriétés de « smart assistance »³³¹ (pour les balances WiFi, détecteurs de glycémie, voir §6.4.2).

Les applications de santé mobiles pourraient s'avérer un canal de suivi de malades chroniques, mais aussi du « télémédicosocial » visant à améliorer l'autonomie à domicile de personnes âgées ou dépendantes³³². En parallèle, la mHealth a également un potentiel en cas d'accident de la route, d'urgence obstétrique, de catastrophe naturelle, ou de conflit. Les technologies et services de santé

³³¹ En Suisse les travaux du laboratoire du Prof. Tröster à l'ETHZ s'intéressent à la télesanté personnalisée (« personal e-health ») : www.wearable.ethz.ch

³³² La mHealth permet par exemple d'effectuer un télémonitoring en temps réel de paramètres vitaux dans le cadre de projet comme MyHeart qui monitore chez des personnes obèses ou chroniquement malades, à l'aide de capteurs non-invasifs des paramètres comme l'ingestion d'eau, ou des chocs hypoglycémiques, les mouvements propres de la prise alimentaire (comme des réflexes de déglutition du bol alimentaire) permettant un suivi en temps réel de la diète et la modélisation de la structure temporelle de cycles alimentaires. A ce sujet, voir le site Automatic Dietary Monitoring de l'ETHZ : www.wearable.ethz.ch/research/groups/health/nutrition/index

mobile présentent également un intérêt pour les pays en développement, dont les systèmes de santé sont moins financés et performants. Toutefois, la croissance fulgurante de la téléphonie mobile jusque dans les zones rurales de ces pays permet d'envisager un déploiement de services mHealth à des coûts d'investissements relativement faibles³³³.

Nul doute que la téléassistance et la mHealth puissent se développer à la convergence du spatial et du terrestre, comme abordé au §9.3.

◇ *La télétransmission de données médicales*

*eHealth Suisse*³³⁴, considère l'e-santé sous l'angle de la « cybersanté » avec des services offerts via des canaux sécurisés sur Internet. D'un point de vue administratif, organisationnel et méthodologique, les solutions de cybersanté poursuivent tout d'abord des axes d'amélioration l'uniformisation du dossier électronique des patients, afin de fournir des données de santé essentielles récoltées par/chez le patient (texte, image, enregistrement audio, vidéo, etc.)³³⁵ « au bon moment, au bon endroit » et leur télétransmission par des moyens électroniques à un professionnel de la santé. En Suisse, un des enjeux premiers de la cybersanté est l'harmonisation de la transmission de données entre les professionnels de la santé (médecins, cliniques, centres de rééducation, physiothérapie, etc.), afin par exemple d'assurer l'interoposabilité des plateformes, de faciliter l'actualisation des données, de dématérialiser les dossiers (réduction du nombre de formulaires, simplification des procédures de facturation, moins de saisies multiples, transmission électronique d'ordonnances, mise à disposition d'attestations et l'établissement de carnets de vaccination numériques, etc.).

La centralisation des données médicales récoltées dans un dossier électronique doit permettre un accès rapide, en tout lieu et en tout temps, aux informations médicales cruciales et leur interprétation immédiate (notamment en cas d'urgence) et l'amélioration des traitements, par la connaissance de l'historique du patient (pathologies et affections passées et en cours, des intolérances médicamenteuses, des allergies, etc.).

L'objectif est d'impliquer le patient dans la gestion de sa santé en lui permettant de personnaliser à sa guise le type de notifications souhaiter selon leur profil (allergie, asthme, etc.) et les traitements préalables ou en cours. Il s'agit donc essentiellement d'une approche orientée « systèmes d'information

³³³ Selon un rapport des Nations Unies et de la Fondation Vodafone, les mHealth peuvent fournir des prestations suivantes pour les pays émergents : la sensibilisation, des « hotlines santé », un support au diagnostic et au traitement, la formation des professionnels de la santé, le suivi de la dissémination de maladie en cas d'épidémie, le télémonitoring, la collecte de données à distance (Vital Wave Consulting 2009).

³³⁴ Site web de eHealth Suisse, l'organe de coordination cybersanté de la Confédération et des cantons : www.e-health-suisse.ch
³³⁵). Le contenu d'un tel dossier électronique comprendrait par exemple des images médicales (radiographies, photographies de biopsies etc.); des rapports médicaux ; des résultats d'analyses biologiques ; des enregistrements de paramètres physiologiques (courbes d'ECG, de tension artérielle, etc.) ; des vidéos issues d'exams cliniques ; des conseils personnalisés (nutritionnels, physiothérapeutiques, etc.) ; ou encore les données d'assurance du patient.

de la santé » basée sur le web et le déploiement en cours de l'Internet des objets.

✧ *La téléassistance médicale*

La téléassistance médicale implique la réalisation d'un acte médical à distance par un professionnel de la santé dûment habilité à délivrer des télésoins en particulier aux de patients maintenus à domicile ou aux personnes nécessitant des traitements préventifs ou curatifs réguliers et sur de longues périodes (personnes âgées, à risque, convalescentes, handicapées, malades chroniques). La télé-réhabilitation semble particulièrement pertinente pour le suivi post-thérapeutique à distance d'affections psychiatriques³³⁶ (voir §9.4.3) ou neuromotrices³³⁷ et la rééducation ou la physiothérapie à distance.

La téléassistance permet l'accompagnement de femmes enceintes présentant des grossesses à risques, ou encore l'encadrement de personnes handicapées, ainsi que l'assistance de personnes isolées (nautisme, alpinisme, sous-marins et bien entendu simulation d'ECA).

En ECA, la téléprésence peut passer par la télérobotique avec des applications comme la télé-échographie ou la téléchirurgie assistée par ordinateur. L'ESA travaille activement sur la télérobotique, en cofinçant de nombreux projets à l'image d'ARTIS (Advanced Robotic Tele-echography Integrated Service)³³⁸, un projet de télé-échographie robotisée porté par le MEDES français. En ce qui concerne la téléchirurgie, les techniques reposent sur des dispositifs de réalité augmentée et/ou sur l'usage de robots chirurgicaux télécommandés (Haidegger & Benyo 2008; Haidegger et al. 2012) via des gants dotés de capteurs de position reproduisant précisément les gestes de l'utilisateur.

✧ *La téléformation biomédicale*

La téléformation médicale vise à délivrer un enseignement médical à distance par le biais de supports numériques. L'établissement de programmes de téléformations interactives est crucial pour chacune des phases du programme Oïkosmos, tant pour la préparation au sol de l'équipage, que pour le maintien des connaissances durant la mission. Les synergies de recherches incluent les sujets tels que :

- le développement et test de logiciels et d'outils opérationnels pour l'apprentissage,

³³⁶ À titre d'exemple, le projet MONARCA (Monitoring, treatment and prediction of bipolar disorder episodes) piloté par l'ETHZ vise à permettre un suivi à distance de la santé mentale de personnes bipolaires en recueillant des informations sur la physiologie, sur le comportement de personnes, afin d'évaluer son état mental et de prévenir l'apparition de manies, de dépressions, ou encore de burn-outs et de fournir une téléassistance ciblée en cas de besoin. Site du projet : www.wearable.ethz.ch/research/groups/health/MONARCA

³³⁷ Basé sur des capteurs, le projet CuPiD (Closed-loop system for personalized and at-home rehabilitation of people with Parkinson's Disease) vise quant à lui à assister les personnes souffrant de la maladie de Parkinson. Des détecteurs de mouvements portables permettent d'identifier puis de suivre les mouvements nécessaires pour la réhabilitation du patient à domicile. Une interface type jeu vidéo permet de proposer ensuite des exercices adaptés de manière ludique et motivante. Site de CuPiD : www.wearable.ethz.ch/research/groups/health/CuPiD

³³⁸ Site web de ARTIS : www.medes.fr/home_fr/telemedecine/teleconsultation/artis.html

l'entraînement et la maintenance de compétences complexes : jeu d'entraînement et contrôle manuel d'objets à distance (simulations d'expériences scientifiques, simulation d'amarrage d'engins spatiaux pour l'approvisionnement, etc.) ; solutions de coaching interactif ou de rééducation fonctionnelle thérapeutique basée sur des applications de mHealth ; programmes de formation continue pour maintenir les connaissances pour opérer les équipements expérimentaux, informatiques, de monitoring, etc. ; programmes d'entraînement permettant de se préparer à des situations d'urgences ou à l'apparition de conditions spéciales.

- la réalisation de simulation via des supports de télémédecine³³⁹ : développement de mannequins « intelligents » (dotés d'un pouls palpable, d'un rythme cardiaque audible, clignant des yeux, etc.) couplés à des systèmes informatiques permettant d'entraîner les réanimations cardio-pulmonaires, des interventions intraveineuses, des intubations, ou de simuler les effets de ces mesures sur ce patient virtuel ; développement de programme de simulation d'altérations de systèmes vitaux (cardiovasculaires, neurologiques métaboliques, etc.), par exemple via des profils de patients ayant subits des maladies (infarctus, brûlures, choc hypovolémique, etc.), ou de personnes évoluant au sein d'environnements dont les conditions ont été altérées.

9.4.2 De la télémédecine à la télésanté : vers un élargissement de la recherche synergistique sur la santé humaine en ECA

Comme le démonstrateur d'ECA doit permettre de conduire des simulations visant à déterminer les effets sur la santé, la performance, ou le sommeil de la vie en habitat clos sur de longues périodes. Un des enjeux consiste à tester des contre-mesures pour lutter contre des changements inopinés de conditions environnementales et maximiser le bien-être de l'équipage malgré les fortes contraintes en présence.

Puisqu'une mission habitée vers Mars nécessite *de facto* un suivi à distance de l'état de santé des personnes, des organismes et des conditions environnementales de l'ECA, on imagine bien l'intérêt des technologies de la télésanté et pour la récolte automatique, la télécommunication et le traitement continu des flux d'informations à des fins d'analyse soit par l'assistance au sol ou alors par l'équipage en vol, pouvant amener à l'application de télésoins en cas de besoins.

Dans le contexte du simulateur d'habitat clos, des campagnes de « bed-rest » d'un nouveau genre pourraient être organisées, offrant l'opportunité d'accomplir des études portant sur les sciences omiques et la télésanté et étalées sur de longues périodes, et en conditions de monitoring maximum.

³³⁹ Voir par exemple les résultats de l'étude germano-russe TEMOS de 2004 : Telemedical Emergency Management on Board the International Space Station, disponible sur : <http://www.egms.de/static/resources/reports/temos2004/TEMOS.pdf>

En élargissant la recherche en télémédecine – qui ne date pas d’hier et qui fait l’objet d’une riche littérature (Kanas et al. 2001; Kanas & Manzey 2008) – à celle de la télésanté en général, dont on a évoqué précédemment l’intérêt terrestre, Oikosmos permettra d’envisager une recherche synergistique basée sur le développement d’appareils de santé mobile (mHealth) dotés de systèmes interactifs conviviaux (interfaces simples, flexibles et multiplateformes), pour une utilisation à domicile ou en déplacement, et favorisant une appropriation rapide par l’utilisateur, permettant de récolter données biomédicales et communiquer les résultats via des applications mobiles accessibles par les professionnels de la santé ou des communautés d’utilisateurs.

La télésanté décrite ici repose donc sur des équipements aux applications biomédicales multiples basés sur la bioingénierie pour l’établissement des diagnostics médicaux ou pour délivrer des soins médicaux d’assistance, de prévention et de réhabilitation :

✧ *Appareillages miniaturisés et automatisés pour le diagnostic médical*

- instrumentations de micro-, voire de nanobiopsie pour le prélèvement d’échantillons humains (biopsies musculaires ou de la peau) ;
- équipements d’analyse de la structure d’organes : investigations thoraciques et abdominales (ultrasoniques ou endoscopiques), analyse microstructurale des os (étude de l’ostéoporose) ;
- équipements compacts pour l’identification de micro-organismes pathogènes, d’allergènes, etc. ; l’identification de biomarqueurs sanguins ou urinaires ; la quantification de dérèglements métaboliques endocriniens, osseux, musculaires, etc. ;
- appareillage de biomonitoring non invasif pour l’analyse d’échantillons humains (à partir d’échantillon de salive, de transpiration, d’urine, etc.) ou le sensing thermique ;
- instrumentations d’imagerie biomédicale compactes et ergonomiques basées sur des techniques de fluorescence, bioluminescence et immunofluorescence, ainsi que de microscopie optique, électronique (à transmission, à balayage), à force atomique, pour des analyses histologiques et ultrastructurelles (tissu humain ou végétal), morphologiques (cellules, bactéries, organelles).

✧ *Soins médicaux d’assistance, de prévention et de réhabilitation*

- instrumentations seront basées sur des puces biomédicales électroniques (§9.3) présentant des fonctions de télémonitoring, de télésurveillance et/ou d’alarme en cas : de malaises ou de dérives de données vitales (domaines d’applications : soins médicaux à distance pour des citoyens habitants en zones rurales, isolées ou inaccessibles, prise en charge des maladies chroniques, soins médicosociaux comme l’hospitalisation à domicile, milieux hospitaliers, entreprises dont les activités se déroulent dans des milieux isolés et/ou dans des conditions extrêmes, soins médicaux fournis aux personnes détenues, acquisition de données lors d’études académiques, cliniques ou pharmaceutiques) ; de fatigue ou de stress (domaines d’application :

gestion du trafic aérien, opérations chirurgicales, interventions boursières/financières, etc.) ; de dépassement seuil prédéfini d'une fonction physiologique en lien avec une activité physique (domaines d'applications : médecine de la performance, milieu du sport, etc.) ;

- systèmes de télésanté pour la préparation de missions Mars : infrastructures médicales adaptées aux conditions hostiles (température réduite, de fortes expositions à la chaleur et la lumière) ; dispositifs de téléassistance médicale (et des applications TIC associées) permettant de recommander un traitement ou d'effectuer un acte médical à distance (Martin et al. 2012) ;
- technologies de traitement de troubles musculosquelettiques causés par la sédentarisation (manque d'exercice) et de maladies osseuses (ostéoporose) ;
- instruments ergonomiques pour l'entraînement physique (voir §8.2.7), l'évaluation de l'activité physique (accéléromètres, podomètres, etc.), le contrôle de la posture et de la locomotion, de mesure de paramètres physiologiques (monitoring de biofeedback ou neurofeedback) ;
- équipements sportifs évolutifs (chaussures à mémoire de forme, chaussettes anti-crampe, vêtements intelligents avec senseurs intégrés, etc.) ;
- design d'équipements médicaux permettant un support respiratoire (hyperbarique) en cas d'accident de décompression (« maladie des caissons ») ou d'anesthésie permettant d'éviter la formation de microbulles dans les fluides corporels ;
- kits médicaux pour le traitement d'affections dentaires, gastroentériques, de la vue, etc. ;
- protocoles pour la réhabilitation post-traumatique, pour la réhabilitation suivant un alitement prolongé pour les applications médicales en médecine du sport et en gériatrie (Orlov et al. 2014).

9.4.3 La télépsychiatrie

Le programme Oïkosmos offre un large éventail de possibilités pour la recherche en télépsychiatrie en habitat clos afin d'évaluer et d'optimiser le cadre de vie et de travail de ses occupants. Les applications terrestres incluent les activités, les projets ou les missions en conditions extrêmes (vie sur les plateformes pétrolières, dans des sous-marins, activités de l'armée, vie dans les prisons, campagne dans des lieux isolés aux Pôles ou en montagne, étude d'isolation dans les abris antiatomiques, etc.), avec des applications dans des contextes nécessitant un haut degré de compétence interpersonnelle (milieu hospitalier) ou poussant à la performance (sport de haut niveau, finance).

L'évaluation à distance de l'état psychologique de personnes vivant en habitats clos, tant au niveau individuel qu'au niveau des relations interpersonnelles, est abordée ici selon le découpage suivant : évaluation de l'état psychologique d'individus évoluant en habitat clos (§9.4.3.1) ; psychosociologie en habitat clos (§9.4.3.2) ; suivi des relations avec le personnel d'assistance à distance (§9.4.3.3) ; psychophysiologie de l'émotion et de la performance en habitat clos (§9.4.3.4) ; et actions préventives, en particulier au niveau de la sélection des participants (§9.4.3.5).

9.4.3.1 *L'évaluation de l'état psychologique d'individus évoluant en habitat clos*

L'évaluation de l'état psychologique d'individus évoluant en habitat clos et exposé de manière chronique à des formes de stress psychologique englobe les thématiques de recherche comme :

- la caractérisation et la prise en compte des facteurs limitants pour la santé psychologique (Kanas 2010), tels que les facteurs de stress : spécifiques aux conditions de simulation (longue durée, altération des cycles jour-nuit habituels, emploi du temps minuté, etc.) ; liés aux contraintes techniques de l'habitat clos (confinement, présences de circonstances hostiles, pas ou peu de contact visuel avec l'extérieur habituel, ressources limitées, niveau élevé de bruit) ; liés à la situation psychosociale de l'habitat (isolation de ses proches, manque d'intimité, contact interpersonnel restreint et forcé) ; liés aux aspects opérationnels et expérimentaux propres au cahier des charges de la mission (surcharge ou sous-charge de travail, impératif de résultats) ;
- l'investigation des réactions et des comportements inadéquats tels que : la perturbation du sommeil, la réduction de la vigilance et fatigue : développement de contre-mesures pour maintenir la synchronisation des rythmes circadiens ; l'altération de l'humeur et du sentiment de bien-être : prévention de la surcharge de travail et des effets secondaires physiologiques de l'isolement (maux de tête, etc.) ; l'ennui et la monotonie : prévention des effets secondaires psychologiques de l'isolement et de l'hypostimulation (charge de travail insuffisante, contacts sociaux restreints avec la famille et les proches) ; l'instabilité émotionnelle, l'hypersensibilité et l'augmentation de l'irritabilité : contre-mesures pour maintenir la motivation et de la vigueur à toutes les phases de la mission (en particulier au troisième quart-temps) (Bechtel & Berning 1991) ; la détermination et identification de comportement anormal ou non souhaité de la part d'un membre de l'équipage (état d'alarme, état de résistance, état d'épuisement, comportements contreproductifs ou déviants) ;
- les conditions favorisant l'adaptation psychologique en habitat clos (Kanas & Manzey 2008) : test psychométrique : mesure de la performance intellectuelle, analyse des composantes de la personnalité, étude de changement d'humeur, etc. ; capacités d'adaptation individuelles au stress (anxiété, insomnie, monotonie, ennui, manque d'intimité, surcharge de travail, bruit, etc.) ;
- le suivi des effets psychologiques de la vie en habitat clos : l'évaluation de l'impact de l'organisation du groupe, par exemple selon la répartition des tâches et des responsabilités (distribution des compétences), selon des processus hiérarchiques ; l'identification des caractéristiques organisationnelles et environnementales contribuant à améliorer ou détériorer les relations interpersonnelles ; évaluation de l'influence des modalités organisationnelles (locaux privés, environnement visuel, règles de communication, restrictions

pour l'utilisation des ressources) et de la dépendance prolongée et permanente à des systèmes de support-vie semi-automatisés.

9.4.3.2 *La psychosociologie en habitat clos*

La psychosociologie en habitat clos semble pertinente pour l'établissement de synergies liées à la dynamique et au comportement en groupe, aux interactions de l'équipage, aux compatibilités interpersonnelles, ainsi qu'aux processus de coopération et de cohésion. Les thématiques de recherche comprennent notamment :

- l'investigation de la structuration, de la communication et de la capacité d'adaptation de groupes en habitat clos ;
- l'évaluation et le suivi de processus de coopération et de maintien de la cohésion de groupe (Kanas et al. 2001) : tension, anxiété, dépression ; manque de vigueur, fatigue, baisse d'attention, confusion ; altération de l'humeur, agressivité ; développement personnel, esprit d'équipe ; charge de travail, confort de travail ;
- l'étude des effets sur la dynamique de groupe (leadership, cohésion, etc.) de tâches imprévues, de situations de crise ou d'urgence (problème technique) ;
- le suivi des perturbations dans les relations interpersonnelles au sein des membres de l'équipage ou entre l'équipage et le personnel au sol : établissement de contre-mesures pour lutter contre les problèmes au sein de l'équipage : compétition, conflits interpersonnels, exagération de l'importance de problèmes banaux, discriminations, minorités, apparition de syndrome du bouc émissaire, comportements territoriaux, retrait de certains partisans de la vie de groupe, formation de sous-groupe et de clans (Kanas 2014) ; études de corrélation entre les caractéristiques individuelles (besoins, attitudes, compétences techniques, scientifiques et relationnelles) et des critères d'évaluations du travail en équipe (Ursin et al. 1991) ; études d'hétérogénéité au sein du groupe : genre, âge, race, langue, panachage de la diversité culturelle des personnes, perception et comparaison sociale, etc.
- l'organisation de processus en groupe et le comportement organisationnel : étude de la répartition du pouvoir, des responsabilités et des rôles, de l'impact du relatif manque d'intimité sur les structures hiérarchiques ;
- l'identification d'éventuelles incompatibilités psychologiques entre membres de l'équipage, caractéristiques de la personnalité, besoins, valeurs et motivation individuelles ;
- le suivi de l'évolution de hiérarchie de valeurs durant la mission, basée sur les travaux de Schwartz (Schwartz et al. 2006), en termes d'autonomie, de stimulation, d'hédonisme, de réussite, de pouvoir, de sécurité, de conformité, de tradition, de bienveillance, etc. ;
- la prévention de l'apparition de conflits issus de différences culturelles : incompréhensions

interculturelles, mauvaises interprétations de comportements liés à des facteurs ethniques, en particulier dans le contexte professionnel (leadership, suivi des ordres, attitudes envers les règles de sécurité et les standards opérationnels, etc.), croyances, habitudes, besoin d'intimité, etc. ;

- la prévention de phénomènes de groupes liés à une trop forte cohésion : illusion d'invulnérabilité, rétention de l'expression des problèmes rencontrés ou désaccords avec des décisions ou des points de vue des personnes extérieures au groupe ;
- l'analyse des effets de l'isolement et du confinement sur la dynamique des groupes, sur la solitude, sur la performance, sur l'humeur, sur leurs capacités d'adaptation individuelles ou du groupe (Tafforin 2013), et la prédiction de comportements inadaptés (antisociaux) en microsociété ;
- l'évaluation de l'interdépendance des compétences (chevauchement de compétence, compatibilité des besoins) : de ses effets bénéfiques (meilleure compréhension, compréhension facilitée, redondance de compétences) ou négatifs (remise en question de l'information ou de l'ordre reçu, potentiellement perçu comme non pertinent, apparition de conflits) ; comparaison avec les cas de dépendance totale dans la compétence de l'autre : apparition de jeu de pouvoir issu du savoir unique ; conséquences de l'absence prolongée d'un membre de l'équipe (accident, maladie, burn-out, suicide, mort, etc.).

En complément, Oikosmos pourrait permettre de tester les limites de l'intelligence collective de microsociétés humaines en observant les comportements d'un équipage de missions spatiales dans des situations spécifiques (Lévy 1994; Zara 2008), avec pour objectifs :

- l'établissement de contre-mesures en cas de défaillances basées par exemple sur : de « mauvaises » prises de décisions en groupe (par exemple, lorsque les membres n'osent pas se dire ce qu'ils pensent) ; des discussions « stériles » ou confuses lors de prises de décisions n'aboutissant en fin de compte à rien de concret ; et la non-réception de l'avis d'experts lorsqu'un ou plusieurs membres d'un groupe se trompent ;
- l'identification et évaluation de l'influence de facteurs consolidant la poursuite de buts communs (succès de la mission) et favorisant l'établissement d'une confiance mutuelle entre les individus d'une communauté d'intérêts, en l'occurrence les membres de l'équipage. De tels facteurs incluent : une structure horizontale avec des règles identiques pour tous les membres ; une organisation dynamique dans laquelle les tâches sont réparties en fonction de la complémentarité des compétences et basées sur une autonomie limitée des membres individuellement ; une prise de décisions stratégiques basées sur le consensus. Sur cette base: analyse de variations de comportements humains, détection d'anomalies basées sur des patterns d'observations ; et modélisation et prédiction de pratiques de collaboration, de leurs dynamiques et de leur impact sur les personnes les pratiquant.

- le monitoring de l'évolution dynamique des interactions de connaissances entre les individus (ici l'équipage) pour améliorer la prise de décision par une meilleure collaboration et pour favoriser l'auto-organisation en réponse à des changements constants de l'environnement. Ceci pourrait être utile à l'évaluation de la résilience d'(éco)systèmes (§7.3.4.3.a), à la manière des approches écologiques des systèmes complexes adaptatifs (Sychev et al. 2003; Reddy et al. 2012; Czapalla et al. 2005; Holling 1986; Macelroy et al. 1987) ;
- étude d'intelligence collective au sein d'un ECA à l'image de celles observées dans la nature chez les insectes sociaux (fourmis, termites et abeilles) (Hölldobler 2009) ou chez les animaux se déplaçant en formation (oiseaux migrateurs, bancs de poissons), à l'image de leur propension à vivre ou à se déplacer en groupe, interaction locale dans un habité (confinement de l'habitat) : évaluation de la somme de connaissance collective circulant dans l'ECA, c'est-à-dire des capacités cognitives des membres de l'équipage, résultant des interactions interindividuelles, homme-machine, ou homme-organismes de l'ECA ; identification des éléments qui influencent le groupe (réponses instinctives à certains stimuli, attitudes, règles comportementales, effet de groupe (absence de procédure, homogénéité idéologique) ;
- le développement de logiciels d'aide à la décision basés sur les connaissances acquises en cours de mission permettant l'optimisation de la charge de travail, l'actualisation continue des plans de maintenance ou le management de la santé (alimentation, exercice physique).

9.4.3.3 *Le suivi des relations avec le personnel d'assistance*

Le suivi des relations entre l'équipage et le personnel d'assistance à distance permet d'envisager la mise en place de synergies liées aux sujets de recherches suivants :

- l'élaboration de procédures et de contre-mesures pour un support psychologique et une assistance technique à distance (Manzey 2004) lors d'échanges d'expériences entre équipiers ou avec le personnel assistance, ou au vu de maintenir l'enthousiasme pour les objectifs de la mission ;
- l'élaboration de stratégies maximisant l'empathie du personnel de contrôle envers des situations spécifiques vécues par les équipiers durant la mission ; fournissant des réponses adéquates pour valoriser et apprécier le travail effectué ; et évitant les tensions internes au sein de l'équipage, ou ne débordant pas avec les relations avec l'assistance à distance ;
- l'étude de l'efficacité des modalités de communications entre membres de l'équipage (communication interne), ainsi qu'entre l'équipage et les centres de contrôle, l'assistance au sol et les proches ;
- la préparation du personnel de contrôle des missions aux longues périodes d'autonomie de l'équipage avec les contraintes des délais de communication (jusqu'à plusieurs minutes) ;

- l'entraînement psychologique des membres de l'équipage et du personnel d'assistance : renforcement des compétences individuelles : compétences interpersonnelles (modalités de communication et résolution de conflits) ; stratégies d'autorelaxation pour améliorer la gestion du stress ; entraînement de survie (en tant que participants ou que coach) ; renforcement des compétences et de la performance en groupe : amélioration de la cohésion (team-building, définition d'un système commun de valeurs et de normes comportementales) ; acquisition de compétences pour une résolution autonome de conflits sous les contraintes de la mission (auto-évaluation et auto-gestion de tensions interpersonnelles) ; identification de critères maximisant la coopération et la cohésion durable au sein de l'équipage ; simulations de situations de crises ; développement d'argumentaire pour le soutien psychologique de collègues ; préparation des activités opérationnelles à effectuer lors de la simulation effective.

9.4.3.4 *La psychophysiologie de l'émotion et de la performance en habitat clos*

La psychophysiologie de l'émotion et de la performance - voir par exemple les travaux de De La Torre et al. (La Torre et al. 2012) - en habitat clos porte principalement sur :

- l'utilisation de systèmes de smart monitoring (voir §9.3.1) pour : le suivi de la performance sur la base de paramètres physiologiques (conductance de la peau, variation du rythme cardiaque, variation de ton de la voix, etc.) ; l'étude des réactions comportementales (motivation, apprentissage, etc.) d'individus visualisant leurs propres données pour atteindre un certain niveau de performance ;
- le développement d'outils de monitoring automatiques pour l'enregistrement en continu, l'historisation et l'archivage de paramètres propres aux activités des membres de l'équipage, à l'image du suivi : des déplacements (nombre de pas, nombre de trajets, etc.) ; de la qualité du sommeil (mouvements, ondes de l'électro-encéphalogramme, etc.) ; des émotions (stress, anxiété, attention, ennui, excitation, etc.) ; de l'alimentation (nutriments, quantité de calories, heure de prise de repas, etc.) ; de l'activité cardiorespiratoire (fréquence cardiaque, fréquence respiratoire, pression sanguine, oxygénation du sang, etc.) ; et de maladies (voir §9.3.2) ;
- l'évaluation et l'optimisation de la performance : dans un contexte où l'on pousse à l'excellence, avec des capacités physiques fortement sollicitées ; le monitoring de facteurs déterminants la performance : amélioration de l'efficacité de communication avec le personnel au sol et atteintes des objectifs des protocoles des missions par l'étude du comportement par le suivi d'interactions observables par des capteurs portés par des personnes, pour l'évaluation de la performance lors de travaux en équipe (à l'image de ceux effectués par des pompiers, chirurgiens, ou top managers) d'une équipe d'astronautes, par exemple via l'étude du ton et de l'intensité de la voix d'un leader d'équipe pour faire passer un message ou un ordre ;

- l'investigation psychophysiological des effets du stress émotionnel et d'autres facteurs psychologiques durant l'ensemble de la mission : analyse d'échantillons sanguins prélevés après des stress mentaux ; études de corrélations entre les altérations immunitaires et les réponses au stress : effets sur le métabolisme cellulaire (taux de purines sanguin), tests de stress, mesures de neuropeptides, d'hormones de stress, etc. ;
- le développement de technologie de décryptage des émotions et le monitoring de l'état santé ou de la performance individuelle : monitoring continu et automatique basé sur des caméras ou des capteurs intégrés aux équipements afin de détecter précocement des signes de surcharge physique ou émotionnelle (chaleur, fatigue) ou d'optimiser les entraînements préparant ce type d'interventions³⁴⁰ ; monitoring de réactions physiologiques (transpiration et modification de la conductivité électrique de la peau, changement de température ou de rythme cardiaque, etc.) ou émotionnelles (battements d'œil, expression du visage, mouvements du corps, etc.) ;
- l'investigation des rythmes circadiens et de la chronobiologie en habitat clos (simulateur au sol, navette ou base planétaire) : développement de protocoles de recherche sur les mécanismes de régulation du sommeil favorisant un sommeil consolidé (« sommeil réparateur »), rendant possibles des réveils précoces (avec ou sans administration de mélatonine), permettant d'éviter les déficits d'attention pour le travail de nuit, améliorant la résistance aux décalages à court terme d'horaire de travail et de repos, facilitant le sommeil de jour ; étude de réalignement circadien (maintien de la synchronisation des rythmes circadiens) ; développement de protocoles d'éclairage à des moments clés du rythme circadien : étude de l'influence sur la sécrétion de mélatonine (en fonction de la longueur d'onde, de l'heure, de la durée, etc.) suivi de la stabilité du rythme circadien en l'absence de signaux temporels diurnes et nocturnes ; étude des effets de spectre de lumière du jour spécifiques sur la performance physique et mentale des membres de l'équipage, sur le niveau d'alerte et de vigilance des individus, les cycles, la durée et la qualité du sommeil, etc. ; étude des mécanismes moléculaires et cellulaires du sommeil : études des voies métaboliques favorisant la synchronisation des horloges biologiques et des oscillateurs circadiens moléculaires ; étude des altérations physiologiques de la relation entre homéostasie et rythme circadien (désynchronisation) ; optimisation de la performance et de la gestion de la fatigue causée par des activités nocturnes, un décalage horaire, des conditions environnementales particulières ou non habituelles, etc. ; étude des effets sur les fonctions neuronales de la privation du sommeil et design de contre-mesures contre les conséquences négatives des dérèglements du sommeil et de la fatigue sur la santé, tant sur l'humeur que sur la performance, permettant de lutter contre : la baisse de l'attention et de la capacité d'intégrer

³⁴⁰ Le projet ProFiTex (Providing Fire Fighters with Technology for Excellent Work Safety) de l'ETHZ vise par exemple à améliorer la performance de pompiers lors d'interventions particulièrement délicates : www.wearable.ethz.ch/research/groups/health/ProFiTex

l'information ; la réduction de la précision et de l'efficacité ; la détérioration de la conscience situationnelle ; l'apparition de problème de raisonnement logique ; la diminution de la réactivité dans la planification et la prise de décision ; la diminution de la qualité de communication, d'interaction et de travail d'équipe ; la réduction de la concentration et de la mémoire de travail ; la détérioration de l'humeur. Domaines d'application : personnel travaillant en rotation de jour ou de nuit : métiers de la santé, de la sécurité, de la production industrielle, du tourisme, du secourisme, de lutte contre les incendies, métiers de l'aviation, activités militaires ;

- l'établissement de simulations sensorielles : méthodologie de mesure de l'effet positif de la présence de zones récréatives offrant un environnement végétal agréable (y compris par réalité augmentée, voir §9.3.3) ; contre-mesures à la réduction de signaux de l'environnement terrestre et stimulations audiovisuelles additionnelles : vidéos, musique (variations d'intensités, de tons, de tempos, etc.) variation des décors via de nouvelles technologies (environnements virtuels, réalité augmentée, etc.) et évaluation de leur effet de la musique sur les réponses psychophysiologiques (conductivité de la peau, activité des muscles faciaux, mesures cardiorespiratoires).

9.4.3.5 *Les actions préventives*

Enfin, la mise au point d'actions préventives comprend les thématiques de recherche suivantes :

- le développement et élaboration de nouvelles procédures de screening et sélection de l'équipage/des participants (voir §8.2.1) : définition des procédures de sélection : exclusion de candidat présentant des risques accrus de développer des maladies mentales (aigüe ou chronique), des troubles non psychologiques (dentaires, digestifs, cardiovasculaires, urogénitaux, etc.) ; sélection psychologique : motivation pour effectuer des tâches, performances psychomotrices, stabilité émotionnelle : évolution des traits de personnalités lors de performances effectuées en conditions de stress ; aptitudes personnelles, attitudes, et expériences préalables répondant aux spécificités et aux objectifs de la mission ou du projet et à la demande psychologique associées développement de critères de sélection individuelle des candidats (facteur humain) : amabilité, contrôle des émotions, patience, tolérance, confiance en soi, sens du travail en équipe, sens de l'humour, capacité à s'occuper tout seul, compatibilité sociale ; évaluation des risques d'anxiété, d'hypersensibilité, d'irritabilité, de dépression ; consolidation et validation des critères de sélection pour des missions longue durée en conditions extrêmes ; prédiction de comportement interpersonnel : élaboration de scénarios de processus de sélection: sélection de 6 parmi 8 individus vs sélection d'une des 2 équipes de 6 individus (expériences menées en parallèle) ; évaluation de la compatibilité psychologique des caractéristiques individuelles : traits de la personnalité homogènes (extraversion, esprit critique,

besoin de dominance ou d'être dirigé, besoin d'autonomie, d'affiliation commune) ; connaissance et expertise technique et scientifique complémentaire, permettant des apprentissages mutuels et instaurant une dépendance vis-à-vis du savoir de l'autre ; étude de comportement, des processus d'adaptation sociale, de fonctionnement et de prise de décisions d'individus en groupe et phénomène de rétention de l'information (Toma & Butera 2009) : étude sur la perception de la connaissance dans les groupes coopératifs (compétences complémentaires entre personnes) ;

- l'élaboration de programme d'entraînement psychologique avant la mission : gestion du stress : familiarisation avec des situations stressantes (entraînement de survie, séjour en chambre de survie) ; préparation des participants et de leurs familles à des absences de contacts directs prolongés ; design de protocole pour simuler des sorties extravéhiculaires ;
- la préparation au management de situations exceptionnelles (situation d'urgence, de crises potentielles), d'origine externe (simulation de pannes techniques, accidents, désastre environnemental) ou interne (simulation de conflit interpersonnel, problème physique, mental ou comportemental, naissance dans l'espace, mort voire suicide d'un équipier) ;
- le développement de procédure pour l'assistance durant la mission : procédures de stabilisation l'état émotionnel, de maintien de la motivation, prévention de la surcharge de travail : développement de méthodologie pour monitorer et interpréter l'état psychologique de l'équipage basé sur : l'analyse d'échanges verbaux et de dialogues entre le membre de l'équipage ; l'analyse d'enregistrements vidéos ; l'évaluation de check-lists remplies régulièrement par les membres de l'équipage ; l'évaluation de données psychophysiologiques issues des équipements de monitoring embarqués ; les communications directes du personnel ; développement de protocoles et de contre-mesures ciblant le phénomène du troisième quart-temps (third-quarter phenomenon), qui semble être la phase la plus critique lors de missions en conditions isolées (indépendamment de leur durée) pour la gestion des émotions et les relations interpersonnelles: stratégie de regain de motivation ; augmentation de communication à distance avec les proches (Bechtel & Berning 1991) ;
- l'étude des relations entre l'équipage et leurs familles, leurs proches : effets du manque prolongé de la famille ou du manque de sexualité ; soutien aux familles pendant et après les missions.

10 Des usagers en symbiose avec leur habitat clos et durable

10.1 Les synergies de recherche liées à la notion d'habitat clos et durable

À ce stade, il paraît judicieux de se pencher sur l'onomastique du nom du programme de recherche qui fait l'objet de la présente étude : « Oïkosmos », en complément de l'introduction au §4.2.3.2. Étymologiquement, la racine grecque *oikos* de ce mot-valise fait justement référence à la notion d'« habitat » et de « maison », alors que *kosmos* renvoie au « monde » et à l'« univers ». *Oikos* est également la racine des termes « écologie » (avec *-logie*, d'après économie), la science qui étudie les milieux où vivent et se reproduisent les êtres vivants, ainsi que les rapports de ces êtres avec le milieu (selon Le Grand Robert de la langue française), popularisé par Haeckel dès 1866 ; et « écosystème », l'unité écologique de base, formée par le milieu et les organismes animaux et végétaux qui y vivent (ibid.), proposé par Tansley dès 1935.

Oikos est donc intimement lié aux concepts de milieu, d'habitat et de maison. Ceux-ci apportent des perspectives complémentaires sur les usagers et organismes évoluant en habitat clos, à savoir les micro-organismes, les végétaux et bien entendu l'homme. Afin de clarifier la portée de ces termes dans le contexte de ce rapport, voici des compléments y relatifs :

✧ *Les conditions du milieu* : le « milieu » est le lieu dans lequel les organismes se trouvent. Il comprend ce qui les entoure matériellement (comme les objets matériels ou les autres êtres vivants), ainsi que l'ensemble des conditions extérieures dans lesquelles les organismes vivent et se développent. Les conditions d'un milieu naturel sont caractérisées par des facteurs abiotiques (physico-chimiques et climatiques) et des facteurs biotiques (biologiques) en interaction continue. Le milieu externe est opposé aux milieux intracellulaires et aux liquides physiologiques du milieu interne des organismes et peut être résumé comme l'ensemble de ce qui est à l'extérieur d'un organisme vivant et qui est susceptible d'avoir un effet sur lui. En ce sens, il correspond à la notion d'exposome dans le cas des ECA et des habitats clos.

✧ *Les fonctionnalités d'un habitat* représentent les modalités d'organisation et de peuplement par des organismes de l'ECA dans leur milieu. Pour l'homme, il s'agit des dispositifs et des équipements techniquement efficaces pour répondre à ses besoins : en termes de sécurité des usagers de l'habitat (par exemple, mise à l'abri des intempéries) ; en termes de sécurité d'approvisionnement (en permettant de stocker leurs réserves et ressources en eau, en nourriture, etc.) ; en en assurant un cadre social entre les habitants ; et fournissant des moyens de communication vers l'extérieur.

✧ *La convivialité d'une maison* : par « maison », on entend le logement dans lequel séjourne sur la durée des usagers, soit un véritable lieu d'habitation. La maison se veut généralement le lieu où il fait « bon vivre », et se profile comme un espace propice à la convivialité et facile d'accès et d'emploi.

Sur la base des éléments ci-dessus, et en complément de ses objectifs scientifiques propres aux missions d'exploration spatiale, le programme Oïkosmos vise – de par sa vocation synergistique et sa connection avec l'ESA – à développer des solutions techniques répondant aux besoins futurs des Européens. Parmi elles, certaines pourraient concerner les habitats de demain, capables d'offrir des conditions du milieu adéquates pour la santé des usagers, à la fois fonctionnels et conviviaux, optimisant les ressources matérielles et énergétiques à disposition localement.

Dans le contexte des ECA, le challenge réside également dans la conception d'habitats clos aussi « durable » que possible, au sens large. Les prochaines sections abordent quelques-unes des synergies de recherches pertinentes autour de cette notion d'habitat clos et durable qui combine et intègre les concepts :

- d'éco-habitat (§10.2) : basé sur une architecture « écologique » et exploitant des écomatériaux ;
- d'habitat autosuffisant (§10.3) : capable de valoriser les déchets organiques de ses usagers et apte à produire tout ou partie de leur alimentation et de leurs objets ;
- d'habitat autonome (§10.4) : favorisant des sources d'énergie alternatives au nucléaire, utilisant des ressources locales pour la production de carburants, dotés d'équipements efficaces énergétiquement et performantes d'un point de vue environnemental, disposant de systèmes d'éclairage artificiel et naturels optimisés, ou à même de récupérer de nouvelles sources d'énergie comme l'énergie corporelle ;
- d'habitat sain (§10.5) : permettant une régulation fine de la santé de l'environnement intérieur et un contrôle de la qualité (microbiologique) de l'air et des surfaces de l'habitat ; et optimisant l'habitabilité, l'ergonomie, le confort et la convivialité pour ses habitants ;
- d'habitat intelligent (§10.6) : dotés de capacités de télécommunication efficaces ; et utilisant des matériaux avancés basés sur les micronanotechnologies et les nouvelles technologies de l'information et de la communication.

L'habitat clos est ici considéré dans son ensemble avec les espaces de vie à disposition de l'équipage, et la totalité des équipements et infrastructures (ECA inclus). Ses usagers potentiels comprennent aussi bien des scientifiques effectuant des études dans des lieux isolés (station antarctique comme Concordia) ou préparant une mission habitée vers Mars dans un simulateur d'ECA, que ceux d'un équipage d'astronautes sur Mars (base planétaire).

Les génies industriels concernés par la construction d'un habitacle étanche sont au premier chef ceux impliqués dans la régulation des conditions environnementales et optimisant sa performance environnementale. Les habitats clos se situent à la confluence des synergies de recherche présentées dans les trois précédents chapitres. Ainsi, l'optimisation de la performance d'un habitat clos évoluant en conditions extrêmes fait ainsi appel à de nombreuses méthodologies et solutions technologiques

issues des champs de l'écologie industrielle, de la biologie systémique et des (nouvelles) technologies de l'information et de la communication. Le Tableau 1 récapitule les connexions entre les concepts relatifs à la notion d'habitat clos et durable et avec ces trois champs disciplinaires.

		CHAMPS DE RECHERCHE		
		Écologie industrielle	Biologie systémique	Technologie de l'information et de la communication
HABITAT CLOS ET DURABLE	Éco-habitat	X		
	Habitat autosuffisant	X	X	
	Habitat sain	X	X	X
	Habitat autonome	X		X
	Habitat intelligent			X

Tableau 1: Connexions entre les champs de recherche du rapport et les concepts relatifs à la notion d'habitat clos et durable.

10.2 L'éco-habitat

Un habitat clos doit pouvoir exploiter au maximum les lignes directrices de l'architecture écologique dans le choix des matériaux de construction respectueux de l'environnement et de la santé de l'homme (écomatériaux). En parallèle, le design de ses infrastructures et la disposition de ses lieux de vie devra bénéficier d'apports énergétiques favorisant le renouvelable et offrir un cadre de vie aussi agréable que possible à ses occupants.

Comme on l'a vu au §7.3.1.4, les architectes spatiaux sont friands de « transformer » des concepts de la nature dans leurs designs (Gruber & Imhof 2007), afin notamment d'adapter la forme à la fonction. L'application des principes d'écoconstruction à un habitat clos tel qu'un simulateur d'ECA ou une base martienne fait appel à une approche interdisciplinaire, impliquant des architectes, des ingénieurs matériaux, des ingénieurs civils, des ingénieurs environnements. Elle a pour objectif d'intégrer des aspects de design d'un système de support-vie (Ashida 2003) comme : l'utilisation efficiente des ressources (écomatériaux) ; l'approvisionnement en ressources à la fois locales et disponibles sur le long terme (habitat autosuffisant) ; le design d'enveloppes capables de protéger l'environnement interne des conditions extérieures hostiles (habitat autonome) ; et la création d'espaces de vie qui satisfont les besoins humains des usagers (habitat sain). L'éco-habitat résultant de cette démarche fera office d'étude de cas extrême d'architecture écologique.

Les contraintes en présence au sein d'un habitat clos nécessitent l'emploi de matériaux performants pour la quasi-totalité de ses équipements, composants et structures, des matériaux aux propriétés variées, allant des écomatériaux (caractérisés par leur faible impact environnemental et discutés ci-après) aux matériaux avancés dits « intelligents » réagissant par exemple aux conditions de l'environnement (voir §10.6).

Classiquement, les exemples d'écomatériaux incluent des matériaux d'isolation comme le liège, la paille ou la ouate de cellulose. À l'état de l'art de la technique, on retrouve des écomatériaux basés sur des matériaux polymères contenant des nanocomposants, de nouveaux métaux à mémoire de forme ou encore des écobétons (Martínez et al. 2017), qui font l'objet de recherches intenses en Suisse, tant à l'EPFL qu'à l'EMPA³⁴¹. La notion d'écomatériaux est ici entendue au sens large, et englobe non seulement les matériaux nécessaires à la construction de l'habitat clos, mais également ceux qui pourraient être utilisés pour n'importe quel appareillage de l'ECA. S'ils devaient être recyclés en cours de simulation/mission, il serait pertinent qu'ils puissent être valorisés d'une manière ou d'une autre (matériellement ou énergétiquement) et sans impacter pas la stabilité de l'ECA.

Si un programme tel qu'Oikosmos vise prioritairement à optimiser les systèmes de recyclage existants,

³⁴¹ Voir par exemple les publications de l'EMPA sur les matériaux avancés et les bâtiments durables : <https://www.empa.ch/web/nest/nest-publication>

il va également plus loin en cherchant de réduire la quantité de matériau par unité de produit. Actuellement, le hardware d'un système de support-vie comme MELiSSA reste lourd dans les phases de R&D, car il s'agit de le tester, le calibrer, et de mesurer un grand nombre de paramètres en vue d'améliorer la compréhension générale du fonctionnement des ECA. Une fois mures, les installations pourront être partiellement dématérialisées, car leur comportement et leur évolution seront mieux maîtrisés. Pour atteindre cet objectif de dématérialisation, l'utilisation de matériaux modulables et de structures multifonctionnelles (structure porteuse servant également d'antenne, ou de canalisations, mobilier reconfigurable selon le type d'activité, etc.) semble des plus appropriée, ainsi que la miniaturisation des systèmes de détection, de régulation et de surveillance miniaturisés. En parallèle, une ingénierie de précision s'avérera indispensable dans les processus de microfabrication de matériaux avancés (à l'image de ceux décrits au §10.6). La dématérialisation du hardware de l'ECA peut être couplée à une intensification des activités de support-vie, par le développement de matériaux présentant un meilleur ratio performance par unité de masse/volume. Par exemple, il peut s'agir de concevoir des composés facilement transportables : denses lors de la phase de transport en navette, mais doté de propriétés d'expansion et donc d'une faible masse volumique et d'une bonne résistance à la compression sous la forme de mousse expansée, à l'image du polyuréthane utilisée pour l'isolation thermique. Des structures gonflables présentent ce même avantage et ont été envisagées par la NASA (projet TransHab), notamment en alternative au module d'habitation de l'ISS (Kennedy 2002). Ces concepts de parois gonflables visent à développer des technologies d'habitats dans l'espace à la fois rigides et plus aisées à lancer (de par leur forme compacte lorsque dégonflée et leur légèreté). Elles sont dotées de couches superposées de matériaux aux propriétés complémentaires (manteau thermique externe, bouclier anti-météorites et anti-débris, couche Kevlar pour le maintien de la forme). De telles structures déployables présentent un intérêt pour des applications pour le développement d'habitat martien : à petite échelle, elles sont applicables sur des modules d'amarsissage ou sur de containers gonflables permettant la récolte des eaux usées de l'ECA, alors qu'à plus grande échelle, elles peuvent servir à déployer des serres martiennes (Hublitz et al. 2004) permettant d'envisager une croissance de la colonie ou de produire des produits biosourcés en cas d'exploitation des ressources in situ. Elles présentent également un intérêt terrestre pour le développement de structures des serres (en particulier pour les cultures de plantes en milieu aride), pour la production de tentes pour des camps de réfugiés (ONU, Médecins sans frontières, etc.). Le projet SHEE (« Self-deployable Habitat for Extreme Environments »)³⁴² est un exemple d'un tel habitat auto-déployable en conditions extrêmes (Doule et al. 2014). Dans une optique de dématérialisation et d'optimisation de volume, cette construction gonflable est composée d'éléments flexibles et robotisés permettant à la fois un déploiement et un repliage autonomes de l'habitat. SHEE se positionne comme un démonstrateur d'habitat planétaire qui sera utilisé lors de missions analogues

³⁴² Site web du projet SHEE : www.shее.eu/main/lang/fra

sur Terre.

Le développement d'un habitat clos pourrait catalyser le développement et le test de nouvelles technologies d'écoconstruction. Il s'agirait par exemple d'optimiser le coût énergétique de la fabrication des matériaux de construction, mais aussi de maximiser leur durée de vie ou d'offrir un potentiel de recyclage à moindre coût. L'approche cycle de vie vise à optimiser le bilan environnemental des matériaux employés (par exemple en termes d'émissions de gaz à effet de serre) tout au long de leur cycle de vie, c'est-à-dire de l'extraction des matières premières nécessaires à leur production, jusqu'à leur élimination ou recyclage (voir en particulier les §5.1.3.3 et §6.2.2). Dans le cadre d'Oïkosmos, cela consiste principalement à réduire autant que possible l'impact potentiel lié à la phase d'utilisation des équipements et matériaux. Quant à la phase de recyclage, elle n'implique pas nécessairement une réduction de la production de déchets organiques, les flux de matières étant le plus souvent bouclés autant que possible dans le contexte des ECA. Cependant, il est clair que les matériaux entrants dans la composition des nombreux équipements et appareillages et composants électroniques, ainsi que les matériaux avancés dotés de propriétés hautement performantes, ont généralement un relativement fort impact environnemental potentiel. Si elle ne semble pas prioritaire, la réduction de l'empreinte énergétique et matérielle liée à la production des matériaux avancés pourrait s'avérer toutefois nécessaire au cas par cas, en particulier pour les matériaux de construction. Le défi consiste alors à trouver un compromis entre une haute performance et un bilan énergétique minimal.

En complément à cette optimisation de leur bilan énergétique, programme Oïkosmos devrait permettre d'effectuer des recherches pertinentes sur les écomatériaux de dernière génération caractérisés par : une performance technique et fonctionnelle durable dans le temps et une qualité architecturale au moins équivalente aux matériaux classiques ; une recyclabilité ou une biodégradabilité maximale ; un faible de risque pour la santé des organismes de l'ECA sur l'ensemble du cycle de vie (matériau sain), de par l'utilisation de matériaux non (éco)toxiques - sans émanations (éco)toxiques pour de l'homme et les autres espèces de l'écosystème ; une facilité d'entretien et des procédures de maintenance aisées ; une sécurité optimale en terme résistance au feu, à la chaleur, etc.

Enfin, il semble également crucial que les principes de l'écoconception pour le design des infrastructures et des équipements de l'habitat clos soient appliqués et fassent partie du cahier des charges des développeurs et chercheurs, ces matériaux devraient dans la mesure du possible : utiliser le plus faible nombre possible d'éléments et de composants ; offrir la possibilité d'échanger facilement des pièces en cas de pannes ou de défaillance ; participer à l'optimisation de la consommation énergétique de l'installation ; présenter des caractéristiques de haute modularité et de multifonctionnalité ; et optimiser l'utilisation de la surface et offrir une ergonomie maximale pour les usagers de l'habitat.

10.3 L'habitat autosuffisant

Lorsqu'il hébergera un ECA complet, un habitat clos pourra être considéré comme un exemple sans précédent d'habitat « autosuffisant », capable à la fois de recycler les déchets organiques de ses habitants, mais aussi de produire tout ou partie de leur alimentation. Ces caractéristiques uniques font appel à certaines des écotecnologies comme celles liées au recyclage hautement efficace des déchets ou à la valorisation du CO₂ discutées aux §7.4. En complément, d'autres applications bénéficieront des avancées de la recherche en ECA, comme le domaine de l'agriculture urbaine.

Basé sur la technologie du mode de culture hors-sol (l'agriculture artificielle a été discutée au §), le concept de fermes verticales, popularisé dans les années 2000 par le Prof. Despommier de l'Université de Columbia, a pour ambition de concilier les technologies agricoles les plus pointues avec les dernières innovations en matière d'architecture durable (Despommier 2010). À un degré supérieur d'artificialisation des cultures, ces structures agricoles proposent d'intégrer en trois dimensions les technologies les plus récentes de production agricole indoor, au sein d'infrastructures hébergées en pleine ville (Vogel 2008; Lemay Lab 2016). Également nommée « sky farming », cette thématique populaire s'est développée dans un contexte de population urbaine augmentation et de manque de surface agricole. Elles ont le mérite de répondre aux contraintes spatiales tout en maintenant une production locale. Même si l'augmentation de productivité permet de compenser probablement une partie des coûts élevés de développement, de construction et d'exploitation du bâtiment, de tels systèmes présentent de nombreux enjeux, afin d'en faire de véritable biosystème autonome (Benke & Tomkins 2017). Dans un contexte occidental, l'agriculture 3D permet d'optimiser les solutions qui permettront potentiellement à terme de tendre vers le concept de « ville compacte ». L'intérêt est également marqué en particulier pour les pays émergents qui subissent une pression sur leurs ressources hydriques. Ces processus de valorisation ne doivent toutefois pas nécessairement impliquer systématiquement l'usage de hautes technologies coûteuses. L'enjeu premier réside dans leur bon dimensionnement.

Ce nouvel exemple d'agriculture en milieu urbain se veut capable à la fois de subvenir aux besoins alimentaires des habitants en quantité et en qualité tout en préservant l'environnement et en ménageant les ressources. Par opposition à une agriculture horizontale, extensive ou intensive, les fermes verticales offriront la possibilité de produire des aliments verticalement de façon à optimiser la consommation de sol. Raison pour laquelle des villes comme Singapour, dont peu de surfaces restent disponibles pour l'agriculture classique, développent des projets pilotes pour profiter de cette productivité³⁴³. Dans une telle agriculture urbaine, la production locale de végétaux dans des serres verticales intégrées permet notamment de réduire les émissions et les impacts liés à l'approvisionnement en nourriture, d'éviter l'usage de pesticides, et de boucler les flux d'engrais. La chaîne de production à la distribution pourrait

³⁴³ Skygreen, développé par la « Agri-Food and Veterinary Authority » et dont la commercialisation est prévue par Private Firms DJ Engineering

être réalisée quasi intégralement dans une telle installation, de l'ensemencement au conditionnement des aliments. Et ceci à une échelle jusqu'à présent inédite. Mais l'enjeu des fermes verticales ne réside pas seulement dans la production de la nourriture sur un espace restreint et de manière viable économiquement. Il s'agit aussi de produire de l'énergie (suffisamment pour couvrir sa propre consommation) et de recycler les principaux effluents urbains. La technologie mobilisée pour ce projet va donc bien au-delà d'une « simple » installation hydroponique. En effet, l'idée ici est de produire de la nourriture en valorisant les flux issus de ce que l'on pourrait qualifier d'écosystème urbain.

Des différences régionales fondamentales existent de législation en matière territoriale³⁴⁴, et les cultivateurs et les producteurs doivent souvent s'ajuster, afin de rester en conformité avec les exigences légales en constante évolution de la plupart des pays (Bamsey, Graham, et al. 2009). Habituellement, la plupart des villes européennes sont alimentées par des flux (inputs) tels que de l'eau, de la nourriture, et de l'énergie, provenant généralement de l'extérieur de son territoire (en particulier la nourriture et l'énergie). Ses flux sont consommés et transformés (métabolisés) avant de quitter la ville (outputs) sous la forme de déchets tels que des eaux usées et de la matière organique par exemple. Dans un tel écosystème quasi totalement ouvert, le comportement « linéaire » de ces flux pose de nombreux problèmes tels que la pollution environnementale (micropolluants) des nappes phréatiques ou l'engorgement dans les stations d'épuration (STEP), lorsqu'elles sont présentes. Ces dernières permettent de traiter ses eaux et de concentrer les déchets organiques sous forme de boues d'épuration³⁴⁵. L'idée consisterait à valoriser les flux d'eaux usées urbaines, riches en substances nutritives, pour alimenter les tours agricoles et produire de la nourriture. En tirant profit des précieux déchets organiques, la ferme verticale se comporterait alors sous certains aspects comme un véritable écosystème artificiel, capable de recycler les effluents urbains.

À une autre échelle, l'intérêt des ECA spatiaux réside précisément dans cette valorisation matérielle des déchets organiques issus de l'épuration des eaux. En réentrant dans le cycle, les déchets des effluents urbains deviennent alors des nutriments qui permettent la production de nourriture, notamment la nitrification de l'azote ammoniacal, une étape déterminante pour rendre cet élément assimilable par les

³⁴⁴ L'urbanisation en Amérique du Nord est fondamentalement différente de celle que nous connaissons en Europe et particulièrement en Suisse, ce qui implique l'agriculture urbaine n'a pas le même potentiel dans le contexte européen que dans celui des États-Unis, d'où proviennent la plupart des concepts d'agriculture artificielle, que se soit en fermes verticales ou sur les toits des villes. Les surfaces à disposition ne sont pas les mêmes. De plus, la législation en matière territoriale est très stricte sur notre continent et les zones agricoles et zones urbaines sont clairement définies.

³⁴⁵ Cette biomasse peut ensuite être valorisée énergétiquement tout d'abord la production de biogaz puis d'électricité et de chaleur par cogénération dans un deuxième temps. En Suisse, le réseau de STEP représente un maillon particulièrement important de l'écosystème urbain. Relevons au passage que le pays a interdit il y a quelques années l'épandage des boues d'épuration afin de fertiliser les champs, notamment au vu de leur teneur en micropolluants, en métaux lourds en micro-organismes pathogènes. Or, les STEP communales de Suisse produisent chaque année quelque quatre millions de tonnes de boues d'épuration liquides, correspondant à environ 200'000 tonnes de matière sèche. Les volumes valorisables sont donc conséquents, même à l'échelle d'un petit pays comme la Suisse.

Voir la page dédiée aux boues d'épuration du site de l'Office fédéral de l'environnement : www.bafu.admin.ch/abfall/01472/01481/index.html?lang=fr

plantes supérieures. Un simulateur d'ECA optimisera à coup sûr le faible volume global à disposition pour les cultures végétales en pratiquant à son échelle une telle agriculture 3D. Mais ce n'est pas l'unique potentiel, puisque le démonstrateur d'ECA peut également s'avérer être une installation pilote pertinente pour le développement de nouveaux types de traitement d'effluents urbains (voir industriels), couplés à la valorisation de biomasse. L'approche des fermes verticales offre ainsi une opportunité de coupler la production de nourriture locale au traitement décentralisé des eaux usées, en produisant même un bilan net d'oxygène. Dans cette perspective de valorisation des déchets, la production agroalimentaire n'est alors plus l'objectif principal, mais simplement un avantage indirect profitant des fortes concentrations d'azote et de phosphore présent dans ces effluents urbains issus aussi bien des ménages que des activités industrielles. Les fermes verticales se profilent comme des plateformes technologiques capables de minimiser les pertes d'éléments organiques qui sont autrement rejetés et dilués à la sortie des stations d'épurations classiques. Par la combinaison de solutions technologiques (d'épuration des eaux, de cultures en conditions hydroponiques et/ou aquaponiques, et de valorisation de biomasse³⁴⁶.

À l'échelon inférieur, des mini-écosystèmes autosuffisants à destination des ménages sont en développement, à l'image de produits commerciaux grand public comme le « Biosphere Home Farming », issu d'une réflexion prospective de Philips³⁴⁷ à la fin des années 2000, censé permettre à chaque famille de produire une partie de son alimentation dans son environnement domestique³⁴⁸. Concrètement, dans cette mini-ferme composée de containers empilés les uns sur les autres, les éléments entrants (eaux usées du ménage, rayons du soleil et déchets organiques) permettent la production de légumes, fruits, poissons, crustacés, et même de méthane. La Biosphère capture la lumière du jour par le biais de fibres optiques. Les plantes poussent par la combinaison de l'utilisation de ces sources de lumière, d'eau et de déchets organiques. Le système est conçu pour produire de la laitue, des tomates, des concombres, et différentes sortes de poissons et de crustacés, et est alimenté énergétiquement par du méthane à partir des déchets organiques de la biosphère. Selon Philips, la commercialisation de ce type de produit pourrait intervenir dans une fourchette de dix à quinze ans.

³⁴⁶ Le fait que les fermes verticales puissent valoriser des effluents urbains amène par exemple à une double réflexion : le recyclage et la valorisation de ces flux par des processus de recyclages biologiques sont une très bonne chose et pourraient par là même renforcer l'acceptabilité sociale de cette technologie, au vu de sa relative performance environnementale. D'un autre côté, cette acceptabilité sociale pourrait être mise à mal par le fait que les effluents urbains sont perçus comme inconfortables, vecteurs par le passé de nombreuses maladies, et chargés en polluants de toutes sortes. Une production locale d'aliments à partir d'effluents concentrant les déchets organiques humains pourrait dissuader le citoyen « consommateur » de se nourrir de ces produits. Les garanties sanitaires de ce système sont déterminantes pour leur adoption.

³⁴⁷ Vidéo présentant le concept de Philips Biosphere Home Farming (Philips Design Probes) : <http://designprobes.ning.com/profiles/blogs/food-for-thought-1> (dernière consultation le 20.06.2015)

³⁴⁸ Selon Bertrand Rigot, directeur de création chez Philips Design: « Il s'agit d'une Biosphère verticale, une sorte d'usine naturelle pour produire de la nourriture sans utiliser d'électricité, et ce dans l'environnement domestique. Ce concept est une réponse à un problème socioculturel. La population va continuer de croître dans les quinze années à venir. Et dans les pays en voie de développement, la nourriture continuera de manquer et les prix continueront de grimper. C'est pourquoi nous proposons un système autosuffisant, dont le but serait de pallier ce problème ». Ecouter l'interview de Bertrand Rigot sur la RTS du 13.04.2009 : <http://www.rts.ch/la-1ere/programmes/le-journal-du-matin/365603-journal-du-matin-du-13-04-2009.html#365608>

Citons également un exemple de produit grand public recréant un mini-écosystème marin, l'*AquaWorld*³⁴⁹, dont les créateurs ont pu participer aux expérimentations sur les biosystèmes similaires clos sur la Station spatiale russe MIR. Ce système n'est pas destiné à produire de la nourriture pour les acheteurs.

Dans un tout autre registre, les machines-outils dotées d'une commande numérique ouvrent la voie vers de nombreuses applications dans le contexte d'Oïkosmos. En particulier, les technologies d'impression 3D se sont largement démocratisées au début des années 2010, au point d'atteindre un effet seuil qualifié par certains de « nouvelle révolution industrielle » (Anderson 2012). L'impression 3D peut servir à manufacturer toute sorte d'éléments utiles dans le cadre des missions spatiales, tels que des matières premières comme le plastique, utiles à produire des pièces de rechange des équipements et instruments de l'ECA, des parties de meubles à assembler, voire même de petits cadeaux personnalisés offerts par les proches restés au sol et envoyés en cours de mission. Elle permet également d'envisager l'exploitation de certaines ressources martiennes, moyennant des étapes préparatoires d'extraction, de transformation et d'adaptation des ressources aux processus de l'impression 3D (Leach 2014). Concrètement, l'ESA a par exemple récemment accompli une étude de faisabilité sur le potentiel de l'impression 3D pour construire une base sur la Lune à partir de matériaux du sol lunaire, en collaboration avec des industriels³⁵⁰. Les études de ce type se sont multipliées, au vu de l'intérêt d'utiliser les ressources in situ de la planète Mars, par frittage laser de basaltes provenant du sol martien, pour imprimer des unités structurales permettant la construction d'un dôme (Kading & Straub 2015).

On l'a vu, le CO₂ atmosphérique martien peut être capturé et intégré dans la biomasse de l'ECA (§7.4.3.4), puis servir à la production de consommables par bioraffinage pour les imprimantes 3D. À titre d'illustration, il s'agirait de fabriquer des bioplastiques d'origine végétale grâce à des plantes cultivées à l'intérieur de serres à vocation non alimentaire (emballage)³⁵¹ ou d'élaborer des matériaux à partir d'algues, comme le « Seaweed Filament »³⁵². La NASA a de son côté exploré comment imprimer des aliments transformés (pizzas, biscuits, etc.) pour l'équipage, à partir de cartouches d'ingrédients (sucres, protéines, etc.)³⁵³. L'intérêt repose par exemple sur la possibilité de minimiser la quantité de déchets produits lors de la préparation des repas, de doser les apports caloriques pour des nutriments spécifiques (suppléments alimentaires, alicaments, etc.), ou de maximiser la durée de conservation des

³⁴⁹ Site web présentant le produit AquaWorld: www.bio-sphere.com/aquamir/eng/bs_bw.html (dernière consultation le 01.04.2014)

³⁵⁰ Voir l'article « Construire une base lunaire en impression 3D », publié le 06.02.2013 sur le site web de l'ESA : www.esa.int/fre/ESA_in_your_country/France/Construire_une_base_lunaire_en_impression_3D

³⁵¹ Voir le produit VEGE3D lancé récemment par la société Vegeplast et Emotion TECH : www.vegeplast.com/2014/02/07/lancement-de-vege3d/

³⁵² Voir le site web de la société Algotpack qui produit ce bioplastiques : www.algotpack.com/transition.php

³⁵³ Dossier de présentation du projet technique de la NASA, publié le 28.03.2013 :

http://sbir.gsfc.nasa.gov/SBIR/abstracts/12/sbir/phase1/SBIR-12-1-H12.04-9357.html?solicitationId=SBIR_12_P1

« poudres » et des huiles alimentaires. En conséquence, l'approche réduit le volume à embarquer de certains consommables permettant de diversifier les sources d'aliments. Ces produits alimentaires plus « exotiques » et complémentaires aux produits classiques des ECA (plantes et micro-algues comestibles) auraient sans nul doute un effet bénéfique sur les astronautes leur moral étant souvent mis à mal par la monotonie des repas durant des missions aussi longues. Reste à s'assurer de la maîtrise de la qualité nutritionnelle et microbiologique des ingrédients, y compris après leur transformation en aliments imprimés.

10.4 L'habitat autonome

En parallèle à la recherche d'une fermeture des boucles de matières, le simulateur d'ECA devra optimiser la consommation d'énergie nécessaire à l'exploitation des systèmes de support-vie, et produire de l'énergie à partir de déchets organiques non valorisables matériellement ou d'un apport externe de gaz carbonique (§7.4.3.4). Ce chapitre se penche sur certains des aspects de la conception des habitats clos favorisant leur autonomie énergétique, dans la perspective de la notion d'habitat autonome.

✧ *L'amélioration de la performance énergétique de l'habitat clos*

Lors des premiers voyages habités vers Mars, il sera bien entendu crucial de disposer de ressources énergétiques en quantité suffisante. Les vaisseaux d'exploration seront probablement équipés de mini réacteurs nucléaires³⁵⁴, capables de produire une forte puissance électrique pour alimenter à la fois la propulsion et les systèmes annexes, notamment ceux garantissant le bon fonctionnement de l'ECA. Toutefois leurs utilisations ne sont pas sans risques: les sources radioactives éloignées ne sont souvent pas recyclées et laissées délibérément dans la nature, voire perdues³⁵⁵, sans compter les accidents de lancement et les risques de contamination associés. Le programme Oikosmos pourrait servir de plateforme de réflexion pour tester des sources d'énergie permettant de substituer l'énergie nucléaire et favorisant des technologies moins risquées. Les thématiques et sujets de recherche incluent par exemple le développement :

- de systèmes photovoltaïques de nouvelle génération : basés sur des cellules solaires à pigments photosensibles, des cellules de silice cristalline hautement performantes, ou des cellules et équipements solaires à couches minces ; dotés de propriétés ultrarésistantes et intelligentes³⁵⁶ capables de déclencher un système d'autonettoyage permettant la suppression (par soulèvement) des poussières externes et des grains de sable se déposant sur les panneaux par la génération d'un champ électrostatique, et capable de faire fondre une éventuelle couche de neige ou de glace et de s'autoréguler en fonction des besoins en électricité des autres

³⁵⁴ La production d'électricité à partir d'énergie nucléaire dans l'aéronautique provient principalement de deux technologies, la fission nucléaire (notamment pour la propulsion spatiale) et les générateurs thermoélectriques à radioisotope (« radioisotope thermoelectric generator » ou RTG en anglais). Les RTG permettent une production d'électricité à partir de la chaleur résultant de la désintégration radioactive de matériaux naturellement riches en radioisotopes.

De telles technologies fournissent une énergie mobile, fiable, compacte, constante, autonome, que beaucoup considèrent comme idéale pour des opérations en conditions extrêmes lors de missions spatiales, raison pour laquelle on peut les retrouver dans des sondes comme Cassini, ou dans le robot Curiosity Voir la fiche d'information de la NASA « Mars Exploration : Radioisotope Power and Heating for Mars Surface Exploration » du 18.04.2006 sur le site du Jet Propulsion Laboratory (consultée le 10 octobre 2013) :

http://www.jpl.nasa.gov/news/fact_sheets/mars-power-heating.pdf

³⁵⁵ Par exemple, la charge radioactive d'Apollo 13 gît au fond des océans.

³⁵⁶ Voir par exemple la société genevoise CleanFizz : <http://www.cleanfizz.com>

équipements de sorte à maximiser leur durée de vie ; ou basés sur des substrats et des cellules photovoltaïques flexibles, imprimables sur des rouleaux (afin de faciliter le transport) et intégrables au revêtement (Heinstein et al. 2013) ;

- de bioénergies (biocarburants comme le biogaz) par valorisation du CO₂ ou bioraffinage (§7.4.3) (Sonnenberg et al. 2007) ;
- de technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau et de production biologique (micro-algues) (Khetkorn et al. 2017) ;
- de batteries lithium-ion de dernière génération (Berecibar et al. 2016).

L'utilisation planifiée d'énergie nucléaire, à plus ou moins grande échelle, pour les besoins des missions spatiales pourrait expliquer pourquoi l'optimisation de l'efficacité énergétique des ECA n'a pas fait l'objet d'une recherche aussi approfondie que celle visant à circulariser les flux de matières dans les ECA. Néanmoins, en minimisant les quantités de matières à embarquer, la circularisation réduit de facto les besoins énergétiques des ECA. L'amélioration de l'efficacité énergétique est en fait sous-jacente à la plupart des optimisations d'autres aspects des ECA. La dématérialisation des équipements peut par exemple diminuer la consommation d'énergie des appareils en phase d'utilisation. La préparation d'une mission habitée vers Mars pourrait ainsi nécessiter de développer de nouvelles techniques de gestion de l'énergie dans les infrastructures et équipements. De sorte que le simulateur d'ECA puisse se profiler à terme comme un habitat *autonome* à plus d'un titre : non seulement en termes de ressources matérielles, mais aussi d'un point de vue énergétique, notamment par un choix judicieux des matériaux, par une construction efficiente (§10.2), par une production locale d'énergie renouvelable, par la fixation de CO₂. Toutefois, si l'on souhaite profiler le simulateur d'ECA comme un habitat à la fois autonome et véritablement durable, il se devrait démontrer sa haute efficacité énergétique. L'enjeu est donc de concevoir un simulateur exemplaire de par sa consommation d'énergie, sa capacité de récupérer la chaleur (produite par l'équipage, par les serres, etc.), et/ou sa production d'énergie par l'intermédiaire des meilleures écotechnologies disponibles (basées par exemple sur le photovoltaïque ou l'ISRU).

Cette perspective d'amélioration de la performance énergétique globale d'un habitat clos inclut les domaines de la physique du bâtiment et les technologies de construction, et en particulier les thématiques de recherche suivantes :

- le développement de logiciels de simulation et de dimensionnement en énergétique du bâtiment ;
- la modélisation du métabolisme du bâtiment (thermique, éclairage, flux d'air, flux de ressources, etc.), et l'optimisation de ses paramètres physico-chimiques comme les charges, l'atmosphère (humidité, composition), etc. ;
- le développement de systèmes de contrôle avancés des bâtiments basé sur des algorithmes

d'optimisation pour le paramétrage et le contrôle du bâtiment, permettant d'offrir des réponses optimales aux conditions changeantes de l'installation et aux besoins de ses utilisateurs ;

- l'optimisation de l'efficacité énergétique de l'habitat clos : simulation et calcul de l'utilisation totale de l'énergie d'un bâtiment pendant toute sa durée de vie (voir le §7.2.5 sur l'analyse de cycle de vie appliquée aux ECA) ; évaluation de la demande énergétique pour l'exploitation de chacune des fonctions et sous-systèmes de l'ECA ; optimisation des processus de production, de stockage, de conservation et de conversion de l'énergie, etc. ; comparaison avec les standards actuels et les ambitions de concepts comme ceux de la Société à 2000 watts³⁵⁷ ou d'habitat mobile autonome comme le SELF³⁵⁸ ;
- développement de méthodologies et de technologies pour le contrôle thermique de l'habitat clos : diagnostic thermique de bâtiments en temps réel ; optimisation des flux d'énergie des charges électriques et thermiques³⁵⁹ ; modélisation du confort thermique dans les espaces occupés ; optimisation des procédés et systèmes : ventilation naturelle (refroidissement passif), régulation de température automatique (thermostat), récupération et de stockage de chaleur (serveurs informatiques, etc.) ; systèmes constructifs dotés d'isolation thermique mince à haute performance (parties opaques ou transparentes) ; adaptation du climat intérieur en fonction des activités de l'équipage (jour, nuit, sport, expérience, etc.) : paramétrage des taux de renouvellement d'air nécessaires ; test des comportements ou des réactions des « habitants » en cas de dérégulation.

Ensuite, l'utilisation des ressources in situ (ISRU) englobe les méthodes d'extraction de matières premières en surface (Naser & Chehab 2018). Ces dernières permettraient la production d'éléments structuraux pour construire une base martienne à partir de basaltes (ou à partir de régolites sur la Lune). Les technologies ISRU pourraient servir à produire de carburants pour la propulsion, mais aussi pour le chauffage, la climatisation et l'exploitation de l'habitat clos (Meurisse & Carpenter 2020). Dans ce dernier cas, elles pourraient fournir des consommables à partir de matières premières comme le CO₂ pour alimenter et permettre l'expansion de l'ECA (voir §7.4.3.4). La dématérialisation des équipements de forage (valves, pompe) et d'excavation est une des difficultés principales de l'application du concept d'ISRU.

Dans un tout autre registre, certains équipements du simulateur d'ECA pourraient exploiter l'énergie corporelle des membres de l'équipage. Concrètement, des vêtements contenant des mini-générateurs

³⁵⁷ Site web de la Société à 2000 watts : www.2000watt.ch/fr/

³⁵⁸ Voir les activités du Competence Center Energy and Mobility, en particulier le projet SELF: www.ccem.ch/science/

³⁵⁹ Voir le Energy Hub du bâtiment expérimental NEST de l'EAWAG et de l'EMPA (§7.4.2.1) sur l'habitat et les places de travail de demain : <http://nest.empa.ch/en/innovation/energy-hub/>

thermoélectriques pourraient par exemple transformer la chaleur corporelle³⁶⁰ en électricité et prolonger la charge des accus d'appareils électroniques portables tels que des senseurs de biosurveillance. Dans ce même but, d'autres technologies cherchent à utiliser nos gestes ou le flux sanguin³⁶¹. D'autres systèmes dits piézo-électriques embarqués dans les chaussures peuvent déjà exploiter l'énergie produite par nos mouvements³⁶². Si les quantités d'énergie récupérées restent relativement faibles, elles le sont en continu et permettent de miniaturiser certains équipements sans avoir à les recharger à intervalles réguliers.

♦ *L'optimisation des systèmes d'éclairage de l'habitat clos*

Lors du transfert vers Mars, un éclairage naturel dans la navette ne sera pas possible, afin de protéger l'équipage des rayonnements cosmiques. Sur Mars, l'ensoleillement, plus faible en moyenne que sur Terre, ne sera pas garanti non plus : les tempêtes et les dépôts de poussières pourraient diminuer la quantité de lumière arrivant effectivement jusqu'aux plantes ou aux micro-algues, malgré la présence de dispositif de systèmes autonettoyants.

Si l'éclairage artificiel des plantes et microalgues sera gourmand en énergie – probablement d'origine photovoltaïque –, la consommation d'énergie pour leur croissance pourra être optimisée grâce à la photobiologie. Par exemple, l'optimisation de la durée de la photopériode permet de réduire notablement tant l'impact énergétique que le temps d'équipage à consacrer aux cultures à productivité équivalente, tout en garantissant une qualité nutritive et gustative inchangée (Massa et al. 2008).

Aux États-Unis, Wheeler et son équipe du Space Life Sciences Laboratory du Kennedy Space Center de la NASA, ont exploré durant des années l'optimisation de l'illumination artificielle des plantes (Wheeler 2003; Drysdale et al. 2008; Wheeler 2017). De nombreuses solutions d'éclairage efficace énergétiquement, basés lampes à diodes électroluminescentes (LED) de dernières générations, sont à l'étude (Graham et al. 2019). Il ressort des études en cours que le choix du spectre de LED peut avoir des effets significatifs sur la morphologie, la physiologie et les mécanismes de défense des plantes (Demey et al. 2000; Massa et al. 2010). Par exemple, les expériences menées au centre Kennedy montrent qu'une lampe à LED bleue aide les plantes à s'orienter, et qu'associée à une lumière rouge, la production de chlorophylle est stimulée, alors que l'ajout d'un peu de lumière verte donne aux plantes une apparence plus naturelle permettant aux agriculteurs-astronautes de mieux évaluer leur état de santé. Afin de développer des technologies pour la croissance de biomasse comestible dans l'espace, le

³⁶⁰ Voir les recherches du Dr. Wulf Glatz, lauréat 2009 du *swisselectric research award* : www.swisselectric.ch/upload/cms/user/090916-Communique-swisselectric-Research-Award.pdf

³⁶¹ Technologies that use human body as power source : www.gizmowatch.com/technologies-use-human-body-as-power-source.html

³⁶² Génération d'énergie pour les petits systèmes électroniques communicants : pucescom.irisa.fr/ateliers/30-.04.-2009/Atelier%20PucesCom%20090430%20-%20Lossec_ENS%20-%20Générateurs%20énergie%20pour%20WSN.pdf

Kennedy Space Center, a développé un système d'éclairage hautement efficient et évolutif : le système HELIAC (High Efficiency Lighting with Integrated Adaptive Control)³⁶³, en partenariat avec Orbital Technologies Corporation (ORBITEC). Grâce à une structure composée d'une matrice de LED qui permet de cibler spécifiquement les parties de la plante en croissance, ce système de distribution de la lumière innove en illuminant la meilleure configuration de LED en fonction de la morphologie de la plante et sélectionne la longueur d'onde la plus efficiente selon le type de tissu photosynthétique. Ce dispositif intelligent s'adapte ainsi à chaque espèce végétale tout au long de sa croissance, maximisant l'efficacité de l'absorption lumineuse des tissus photosynthétiques, sans diffuser inutilement des photons dans un espace vide, avec à la clé une consommation d'électricité significativement réduite. En outre, la lumière peut passer au travers du système si un ensoleillement suffisant est disponible. Lorsque ce n'est pas le cas, l'illumination artificielle prend le relai afin de maximiser le rendement des cultures de production ou des cultures de l'ECA. Ce type de dispositif d'éclairage hautement efficient permet d'explorer des effets de choix spectre de LED sur la morphologie, la physiologie et les mécanismes de défense des plantes. Sur Terre, de tels systèmes peuvent être utilisés dans nombre de serres agricoles, mais également dans pour l'éclairage d'aquariums. Pour les photobioréacteurs, il s'agit de développer des systèmes d'éclairage interne (éclairage 3D) basé sur des réseaux de fibres optiques pour la collection et le transfert de lumière.

En plus d'économiser de l'énergie, les systèmes avancés d'éclairage naturel peuvent améliorer le confort et la santé des utilisateurs. L'intérêt spatial consiste à reproduire un éclairage naturel terrien pour ne pas perturber le rythme circadien de l'équipage. L'EPFL a par exemple créé un simulateur de balayage du ciel et un « héliodon », qui permettent de reproduire avec une grande précision toutes les conditions de lumière du jour qui existent dans le monde entier (Thanachareonkit et al. 2005). Un tel système pourrait s'avérer pertinent pour la simulation des conditions martiennes, que ce soit pour les serres artificielles ou pour les espaces de vie dans lesquels vivra et travaillera l'équipage.

³⁶³ Pour une description détaillée et des illustrations du dispositif HELIAC: www.sti.nasa.gov/tto/Spinoff2010/cg_1.html

10.5 L'habitat sain

Pour qu'il présente les caractéristiques d'un habitat sain, il sera indispensable de maîtriser la santé de l'environnement intérieur dans les espaces de l'habitat clos. Ce dernier sera conçu de sorte à offrir un cadre de vie et de travail propice au bien-être de ses habitants, tant en termes d'habitabilité et d'ergonomie, qu'en termes de convivialité et de facilité d'utilisation. En habitat clos, l'enjeu est de procurer un confort optimal à l'équipage, malgré les conditions de vie extrêmes en présence, puisque ce dernier y évoluera en permanence à l'exception de possibles sorties extravéhiculaires et sur de longues périodes.

Ce chapitre aborde l'optimisation de l'habitabilité puis le contrôle de la qualité microbiologique de l'air intérieur et des surfaces de l'habitat. Enfin la problématique de la protection planétaire sera envisagée dans la perspective de l'habitat spatial sain, c'est-à-dire un habitat devant éviter à tout prix les contaminations croisées.

❖ *L'optimisation de l'habitabilité en système clos*

Comme abordé précédemment, tant un simulateur de mission habitée vers Mars qu'une base martienne devraient avoir la plus faible empreinte possible sur les ressources matérielles et énergétiques. Mais il ne s'agit pas que d'améliorer la seule performance environnementale. L'architecture durable ne doit pas se limiter à des aspects purement techniques ou quantitatifs mais également considérer les aspects qualitatifs. Malgré ces contraintes d'isolement et de confinement, un habitat clos doit offrir des conditions optimales de vie à ses habitants. Autrement dit, l'enjeu pourrait être de répondre à la question suivante : comment offrir faire un maximum de confort et de bien-être aux occupants d'un petit logement ? L'optimisation de l'espace habitable disponible (taille, surfaces, volumes) devient alors un élément crucial pour fournir une habitabilité durable (Kozicki & Kozicka 2011). Il s'agit dès lors de concevoir un habitat à la fois ergonomique et convivial pour ses habitants (Harrison 2009). Ceci concerne particulièrement le design des places de travail, des lieux de vie communs, et des espaces dédiés aux loisirs et aux activités physiques. Il semble par exemple important de veiller attentivement à l'intégration architecturale d'un maximum de fonctions dans un espace minimal, mais aussi d'optimiser la durée de vie des matériaux, de fournir des équipements multifonctionnels et faciles d'utilisation. (Imhof 2007). En fin de compte, diminuer la surface d'habitation tout en assurant des fonctionnalités équivalentes implique d'intégrer des valeurs d'éthique et de sobriété dans les choix nécessaires, afin de n'offrir que des fonctions essentielles présentant le plus grand impact positif sur la qualité de vie des membres de l'équipage.

Le design de compartiments modulables, basés sur des parois mobiles, permettra d'optimiser les volumes à disposition et d'adapter l'environnement aux activités en cours (sommeil, loisirs, préparation de la nourriture, lieu de repas, etc.) (Oungrinis et al. 2014). L'intégration architecturale des

équipements porte également sur le développement de meubles à usages multiples (p. ex. table qui peut servir de couchette, mais qui peut aussi servir de lieu de travail, offrant un gain de place grâce à la multifonctionnalité, et une dématérialisation relative), ainsi que sur l'élaboration et test de systèmes d'éclairage et de décoration avec motifs et couleurs optimisées, paramétrables.

Un exemple révélateur des bienfaits d'une intégration architecturale réussie au sein des habitats clos concerne la relation entre l'homme et les végétaux de l'ECA. En plus de leur action sur la qualité de l'air, sur le recyclage de l'eau et de leur production de biomasse - et donc de leur intérêt nutritionnel -, les serres expérimentales pourraient améliorer l'habitabilité des habitats clos de manière significative. En effet, les chambres de cultures végétales apportent des bénéfices psychologiques, en procurant un enrichissement sensoriel aux membres de l'équipage. Le fait de toucher la texture des plantes, de contempler leur croissance, visible avec le temps, ou encore de sentir leurs parfums procurent détente et épanouissement aux occupants de l'habitat clos (Häuplik-Meusburger et al. 2014). En outre, les plantes sont finalement un moyen de garder un bout de Terre à bord durant les missions spatiales, faisant de leur présence un composant essentiel de l'habitat (Häuplik-Meusburger et al. 2010). L'exploitation des végétaux permet notamment d'avoir des occupations non seulement « sensées », mais utiles pour les « astronautes », puisqu'il s'agit d'un des éléments clés de l'ECA. Les recherches portant sur cette intégration architecturale des plantes pourraient avoir des retombées intéressantes d'un point de vue terrestre, notamment pour le développement de logements compacts en milieu urbain.

Afin de maintenir une atmosphère agréable pour ses habitants, des systèmes de contrôle avancés mesureront précisément et continuellement les conditions environnementales du simulateur d'ECA (conditions aux interfaces avec les compartiments, mais aussi avec l'extérieur) (§9.3.1). Certains senseurs permettront la détection précoce d'un contaminant présent dans le système et l'application immédiate de contre-mesures par l'équipage et/ou l'assistance au sol (§7.3.4.5). D'autres collecteront des informations pertinentes pour optimiser du confort intérieur : détection de la présence ou des mouvements des utilisateurs, mesures des températures (intérieures et extérieures), du niveau d'éclairage, de la qualité de l'air intérieur, de l'ouverture des systèmes d'aération, du rayonnement solaire, etc.).

Que ce soit pour une campagne de simulation ou une mission spatiale effective, les « voyageurs » seront confinés 24 heures sur 24 dans leur habitat. Avec cette immersion constante dans leur lieu de vie et de travail, il semble judicieux que les occupants puissent ajuster les systèmes de contrôle automatique du climat de l'habitat. Cette relative autonomie pour le réglage fin du confort intérieur pourrait leur procurer un effet psychologique positif (Nembrini & Lalanne 2016). Les paramètres concernés sont principalement ceux liés au confort thermique, visuel, et olfactif. La marge de manœuvre pour la personnalisation de ces paramètres exclut bien entendu toutes modifications présentant des risques sanitaires (santé des organismes de l'ECA) ou opérationnels (perturbation de la stabilité de l'ECA tels que réduction de la productivité ou des taux de recyclage des déchets).

Les thématiques et sujets de recherche pour améliorer l'habitabilité incluent : la prédiction et l'optimisation du confort intérieur du bâtiment en réponse aux conditions changeantes (climat extérieur, occupation et utilisation du bâtiment par ses occupants, préférences des utilisateurs, etc.), en particulier pour ses dimensions : 1) acoustique : étude de propagation sonore en systèmes clos et développement de revêtements de protection acoustique, atténuants les perturbations sonores lors des activités et du sommeil de l'équipage ; 2) visuelle : optimisation de la lumière artificielle et développement de systèmes de circulation de la lumière naturelle adéquate ; 3) hygrothermique : optimisation du confort thermique pour les usagers et maintien d'un taux d'humidité constant dans chaque pièce du simulateur, afin d'éviter les ponts froids (condensation) favorisant la production de biofilms ; 5) olfactive : assainissement permanent de l'air intérieur (composés organiques volatils, etc.) et minimisation des nuisances olfactives ; 6) intimité : dans les locaux privés, la possibilité de se changer et de se laver dans l'intimité et d'établir des communications privées (audio, vidéo, courriels, etc.) ; la mise à disposition d'espace de stockage des objets personnels avec possibilité de personnaliser la décoration des espaces personnels et la possibilité de voir à l'extérieur par un hublot ; 7) radiations non ionisantes, l'étude des effets de l'exposition longue durée aux ondes Wi-Fi / Bluetooth / NFC ; et l'optimisation de l'ergonomie des zones de travail (§9.3.3), des espaces personnels et de loisirs (station informatique, équipement de divertissements compacts), ainsi que des équipements et accessoires et des interfaces homme-machine conviviales.

✧ *La qualité de l'air intérieur de l'habitat clos*

De nombreux scientifiques s'intéressent à l'exposition de l'homme (ou des espèces vivantes en général) à des molécules présentes dans l'environnement, qu'elles soient toxiques ou non (voir §7.3.3.1). C'est en particulier le cas pour les polluants de l'air qui sont traditionnellement analysés via par l'intermédiaire de données récoltées par des senseurs sur les façades des bâtiments, ou sur leur toit. Alors que nous passons la plus grande partie de notre temps dans des environnements intérieurs (logements, lieux de travail, commerces, etc.) qui ont pour fonction première de procurer des conditions confortables à ses occupants, des études empiriques montrent que de nombreux composés toxiques sont présents en plus grande concentration à l'intérieur des logements qu'à l'extérieur (Logue et al. 2011; Morawska et al. 2013). Ces études, confirmées par l'OMS (World Health Organization 2010), démontrent que côté air intérieur, les principaux polluants sont les composés organiques volatils (COV) tels que le formaldéhyde, et les particules (y compris les particules ultrafines et aérosols biologiques)³⁶⁴. De plus, ceux-ci sont à l'origine de la plupart des contaminations microbiennes (Lévesque et al. 2018). La caractérisation des et la modélisation des bioaérosols reste un enjeu d'environnements spatiaux comme l'ISS (Salmela et

³⁶⁴ Des dispositifs d'épuration de l'air intérieur sont disponibles sur le marché, sans que l'on connaisse leur réelle efficacité et l'innocuité des systèmes de traitement actuels reste à démontrer, notamment avec l'apparition de sous-produits réactionnels.

al. 2018).

Un habitat sain doit donc prévenir des impacts du bâtiment sur la santé des utilisateurs, en particulier à la qualité de l'air intérieur et à l'hygiène des surfaces des locaux (présence de biofilms). Il doit permettre le contrôle régulier (voire continu) de la qualité de l'air intérieur par des dispositifs fixes ou mobiles, pilotés de manière aussi bien automatique que « manuelle » et informer ainsi les habitants sur la santé de l'environnement intérieur.

La régulation de l'air intérieur est importante tant au niveau terrestre que spatial, par exemple afin d'éviter l'accumulation incontrôlée de gaz. Les contaminants typiquement monitorés sont l'acétone, l'ammoniac, les fréons, le 2-butanone, le monoxyde de carbone, le dichlorométhane, l'éthanol, le méthane, le méthanone, le n-hexane, le dioxyde d'azote, le 2-propanol, le trichloroéthane ou le trichloroéthylène (van Loon et al. 2007; Savage et al. 2001). Des COV produits en habitat clos proviennent en majorité des matériaux, et faiblement des plantes. On trouve parmi eux aussi bien des alcools, que des aldéhydes, des esters, des halocarbones, des hydrocarbures aliphatiques et aromatiques, des produits azotés, des oxydes d'azotes, des acides organiques, ou encore des sulfures (Stutte & Wheeler 1997). L'étude des effets de leur métabolisation par les plantes de l'ECA présente un intérêt aussi bien pour vérifier l'éventuelle phytotoxicité des contaminants de l'air que pour investiguer le potentiel en termes de purification de l'air intérieur par phytoremédiation. Les applications terrestres incluent la modélisation des aérosols atmosphériques, l'analyse spectroscopique et caractérisation morphologique des particules, le développement de détecteur de gaz (polluants non microbiologiques), ainsi que la biofiltration de l'air intérieur diminuant ainsi des symptômes comme ceux liés au « syndrome du bâtiment malsain » (Bamsey, Graham, et al. 2009).

✧ *La qualité microbiologique des surfaces de l'habitat clos*

La lutte contre les infections nosocomiales représente un enjeu sanitaire de taille dans le cadre hospitalier³⁶⁵. La problématique de la qualité microbiologique des surfaces de l'habitat est également un élément clé dans le contexte du simulateur d'ECA, aussi bien au niveau des équipements que des pièces (parois, portes, plafonds, sols) et de leur mobilier (Fahrion et al. 2020).

L'approche de la sociomicrobiologie aide à remédier à ce problème, en s'intéressant aux mécanismes régissant les comportements des micro-organismes. Le système de communication microbien, appelé « quorum-sensing » (QS), permet aux bactéries de réguler la taille d'une colonie en influençant l'expression de gènes de leurs congénères (Daniels et al. 2004). Comme les bactéries évoluent dans des

³⁶⁵ Selon un récent rapport de l'OMS (2011), 7% des patients bénéficiant de soins hospitaliers dans les pays développés contractent des maladies lors d'un séjour à l'hôpital. Ce chiffre grimpe jusqu'à 10% à 15% dans ceux en développement. Voir le descriptif du programme « The burden of health care-associated infection worldwide »

http://www.who.int/gpsc/country_work/gpsc_ccisc_fact_sheet_en.pdf

communautés souvent très denses, le QS leur permet en quelque sorte de posséder une vie sociale, en échangeant des signaux moléculaires. Grâce à lui, les micro-organismes ont la capacité de s'organiser en « biofilm », formant une matrice suffisamment dense pour les protéger du système immunitaire de l'hôte ou d'antibiotiques (Diggle et al. 2007). Comme ces structures bactériennes complexes adhèrent à des surfaces inertes et non biologiques de toute sorte, elle représente un danger en termes de sécurité sanitaire, en pouvant potentiellement provoquer des pathologies ou des infections résistantes à des traitements thérapeutiques. En Suisse, l'importance des circuits du QS dans la virulence d'infections bactériennes a récemment été démontrée par des chercheurs des HUG, en particulier ceux impliqués dans la régulation de la production de facteurs de virulence extracellulaires (van Delden et al. 2012)³⁶⁶. En plus de son intérêt médical, la manipulation du QS a des domaines d'application comme l'agriculture ou l'environnement (Bauer & Robinson 2002). Dans le contexte d'Oïkosmos, l'étude des comportements sociomicrobiologiques dans la formation de biofilms et dans la pathogenèse bactérienne en habitat clos porte sur des thèmes comme l'étude des voies moléculaires et des mécanismes de régulation impliqués dans les circuits du QS ; l'élaboration de moyen de lutter contre l'antibiorésistance en altérant la communication bactérienne ; et l'identification des sécrétions bactériennes en réponse à des stress comme l'exposition à des éléments en trace (comme le chrome ou le sélénium).

Rappelons l'équipage en vol généralement immunodéficient, et que les usagers (humains) ne peuvent pas être stérilisés (!). Par voie de conséquence, une installation comme le simulateur d'ECA devra aussi élaborer des stratégies comparables à celle que les hôpitaux déploient pour diminuer les risques liés aux maladies nosocomiales et maximiser la biosécurité de l'habitat clos. Il s'agira en premier lieu de détecter aussi précocement que possible l'apparition de pathogènes opportunistes, qui pourraient présenter des résistances diverses (aux antibiotiques, aux biocides de désinfection). En ce qui concerne l'écologie microbienne en habitat clos, des projets de l'ESA comme MICHA (« microbial ecology of confined habitats ») ont été déployés dans le cadre de Mars500, afin de caractériser l'évolution des populations et des communautés microbiennes dans des environnements confinés (Canganella et al. 2012).

Dans le cadre MELiSSA, l'ESA a développé, en collaboration avec la société biopharmaceutique Biomérieux, un système automatisé, miniaturisé pour l'échantillonnage et le monitoring de la qualité microbienne de l'air et des surfaces, dans le cadre du projet MIDASS (« Microbial detection in air system for space ») (Bechy-Loizeau et al. 2015)³⁶⁷. Ce système de biosurveillance permet d'évaluer les

³⁶⁶ L'évolution a par exemple permis l'apparition de mutation de gènes impliqués dans le QS qui rendent les bactéries sourdes aux signaux de leurs congénères. Ces bactéries « tricheuses » dépensent moins d'énergie à produire des signaux moléculaires ou des enzymes associés au QS et prolifèrent, tout en devenant également moins virulentes. La présence de ces bactéries égoïstes participe à empêcher à ces pathogènes de « détruire » le malade et évitent en quelque sorte leur suicide collectif. Raison pour laquelle ces mécanismes semblent cruciaux pour permettre une cohabitation entre des micro-organismes pathogéniques – qu'on ne peut pas toujours éliminer – et leur hôte.

³⁶⁷ Voir la présentation du Dr. M. J. Storrs, bioMérieux lors du Workshop de l'ESA sur l'innovation et la technologie liées à l'exploration spatiale, Microbial Detection in Space: The MIDASS project, du 29.04.2010 : ec.europa.eu/enterprise/policies/space/files/policy/conferences_page/workshop_2_ec_esa_29_april_2010/storrs.pdf

risques de contamination microbienne basée sur un monitoring semi-quantitatif en temps réel de l'air et de la surface avec identification microbienne. Doté d'une haute sensibilité (1 CFU, « colony forming unit »), MiDASS permet de signaler la présence de bactéries (y compris celles formant des spores), mais aussi à de valider des procédures de stérilisation. Automatisée quasiment dans sa totalité, la procédure de MIDASS comprend une phase de récolte d'échantillon (de surface ou d'air), de lyse cellulaire, de purification, de concentration, d'amplification et enfin de détection. La quantification du risque de sécurité microbienne par amplification PCR (§6.3.2) a l'avantage de pouvoir fournir un diagnostic rapide (< 3h) en comparaison des méthodes traditionnelles de détection microbienne qui nécessitent une incubation préalable au comptage durant 48 à 72 heures.

Au sein d'un simulateur d'ECA, la biosécurité et la maîtrise de la qualité microbiologique des surfaces intérieures de l'habitat clos portent sur : l'évaluation de la charge microbienne et l'identification des communautés microbiennes ; l'intégrité des équipements : test et analyse de l'efficacité de biocides qui empêche la prolifération de micro-organismes problématiques, comme des opportunistes technophiles pouvant dégrader les matériaux de l'habitat (métal, plastique, polymère, dispositifs électroniques, etc.) et équipements médicaux et expérimentaux de l'ECA (lieu de stockage, réservoir d'eau, filtres d'air et d'eau, serres, etc.) ; l'étude des mécanismes de résistance aux antibiotiques bactériens : détermination in vitro de la concentration minimale d'inhibition de substances aux propriétés antibactériennes, antibiotiques, antifongiques, antiparasites, etc. ; développement de systèmes de monitoring et de métrologie de type MiDASS ; amélioration de la compréhension des phénomènes de dissémination et de survie des micro-organismes aéroportés dans les espaces clos ; l'étude des mécanismes de survie en absence de résistances acquises (dormance).

En conséquence, le développement de solutions innovantes en gestion de l'air et des surfaces d'un habitat clos tel que simulateur d'ECA vise à assurer que les conditions environnementales intérieures ne soient pas préjudiciables à la santé des occupants, et ne déclenchent pas d'allergies ou de troubles comme des maux de tête, ni des intoxications par inhalation, des infections ou des maladies respiratoires (maladies pulmonaires, asthme). Les retombées terrestres variées pourront jaillir de ces démarches d'habitat sain, avec des utilisations ciblant les logements ou le lieu de travail, ainsi que les secteurs hospitaliers et pharmaceutiques, pour ne citer qu'eux.

✧ *La problématique de la protection planétaire intégrée à l'habitat spatial sain*

Une mission d'exploration planétaire présente un intérêt pour les activités liées à l'exobiologie. Cette discipline, aussi appelée astrobiologie, cherche à détecter la présence ou les indices d'une vie extraterrestre éventuelle sur des corps célestes au sein du système solaire ou au-delà (Clancy et al. 2005; Horneck et al. 2016). Elle étudie ainsi l'origine, l'évolution, la distribution, les conditions et la destinée de la vie dans l'Univers. L'exobiologie ambitionne de découvrir une chimie prébiotique pouvant

conduire aux premières étapes de la vie nécessite des contributions de nombreuses disciplines scientifiques comme la chimie, la biochimie, la génétique moléculaire, la géologie, l'astronomie dans toutes ces composantes, ainsi que la vie artificielle et la robotique. Cette science transdisciplinaire souhaite capitaliser sur les découvertes de vie microbienne résistantes environnements terrestres particulièrement arides et sur les avancées technologiques des récentes explorations robotiques. En particulier, l'aspect exobiologique pourrait être un critère important dans le choix du site d'amarsissage d'une « mission Mars ».

En parallèle aux traités internationaux sur l'espace extra-atmosphérique (Nations Unies, Assemblée générale, Bureau des affaires spatiales, 2003), les considérations sur la recherche de traces de vie dans le système solaire, et l'éventualité d'un retour d'échantillons de corps célestes pouvant avoir hébergé une forme de vie, soulève naturellement la question essentielle de la protection planétaire. Concrètement, l'enjeu de cette dernière est d'éviter tout risque de contaminations croisées, que ce soit de micro-organismes terriens amenés par l'équipage sur une planète comme Mars, ou d'éventuels micro-organismes martiens vers la Terre. Les risques associés sont un réel casse-tête pour les agences spatiales, car malgré toutes les précautions prises en termes de stérilisation du matériel et des équipements, il semble difficile de garantir qu'aucune bactérie n'a résisté à de tels traitements sous des formes dormantes telles que des spores ultrarésistantes par exemple (Brack et al. 2002; Fajardo-Cavazos et al. 2007). D'un point de vue éthique, que ferait-on exactement si un équipage devait découvrir de la vie extraterrestre sur Mars ? Comment prédire la réaction de la flore microbienne de l'équipage aux conditions martiennes ou d'apesanteur prolongée (> 6 mois) ? Comment appréhender les risques de génération d'une deuxième forme de vie sur Mars à partir de micro-organismes terrestres (Horneck 2008) ? Pour appréhender de telles questions, la commission scientifique internationale COSPAR (Committee on Space Research) a formulé une politique de protection planétaire (COSPAR Planetary Protection Policy) adoptée et appliquée depuis 1984 (DeVincenzi et al. 1996). Elle catégorise cinq types d'activités spatiales, selon le corps céleste cible et la mission (Rummel et al. 2002; Conley & Rummel 2008). Ces démarches démontrent que les agences spatiales prennent au sérieux les risques de biosécurité. Il en va également de leur image en temps que porteurs de projets, dont la crédibilité serait fortement endommagée en cas d'un hypothétique incident microbiologique. Par voie de conséquence, elles ont tout intérêt de préparer la mission dans les conditions les plus réalistes possibles, au sein d'une plateforme biomédicale simulant un ECA présentant un environnement aussi stérile que possible dès le démarrage des campagnes de simulation. Durant la mission elle-même, le respect de standards stricts de protection planétaire permettra d'éviter autant que possible de prévenir le développement de maladies nosocomiales causées par des micro-organismes introduits lors de l'installation des différents dispositifs et équipements.

En plus de la santé de l'équipage, il s'agit de protéger la santé des autres organismes de l'ECA, afin d'assurer leurs fonctions de support-vie. Directe ou indirecte, l'intégration de la problématique de la

protection planétaire semble quasiment indispensable à la notion d'habitat spatial sain. L'agenda de recherche associé comprend notamment : le développement de moyens de contrôle de contamination avant lancement ; l'optimisation de technologie de stérilisation en salles blanches et le développement de procédures de fabrication et d'assemblage d'équipements et d'instrumentations, en particulier ceux visant à détecter des traces de vie en conditions aussi stériles que possible ; le développement de matériaux dont la surface protège des biocontaminations microbiennes ; le développement de systèmes de tests embarqués permettant de diagnostiquer les changements génotypiques et phénotypiques de la flore microbienne sur sol terrestre, en vol et sur sol martien ; l'élaboration de procédures de prise en charge de traces de vie ou d'éventuels micro-organismes ayant été isolés sur le sol martien ; l'étude du potentiel de formation de spores et de résistance microbienne aux procédures de stérilisations et de nettoyage ; la simulation en laboratoire d'environnements planétaires extrêmes pour l'étude des effets sur les organismes de l'ECA.

10.6 L'habitat intelligent

L'habitat de demain veillera sur ses occupants en lui fournissant des prestations personnalisées et évolutives³⁶⁸. Comme évoqué précédemment, les équipements des bâtiments (chauffage, climatisation, ventilation, stores, éclairage naturel) feront appel à des systèmes avancés de contrôle optimisant confort intérieur (acoustique, olfactif, thermique, visuel, qualité de l'air) et la performance énergétique en réponse aux conditions extérieures, à l'usage du bâtiment, et aux préférences des utilisateurs.

L'habitat intelligent combinera des capacités de télésurveillance (médicale, environnementale, confort intérieur), avec des systèmes de (télé)assistance personnalisables et mobiles : offrant des services et des applications basées sur le contexte de l'utilisateur : position dans l'habitat, conditions météorologiques, préférences personnelles, présence d'autres connaissances de l'utilisateur à proximité, etc. ; influençant le comportement de ses occupants via des recommandations de comportements à adopter ou de réglages à effectuer pour réduire l'impact environnemental lié à l'exploitation habitat (éclairage, chauffage, stockage préparation de la nourriture). Il s'avérera donc nécessaire d'intégrer adéquatement de nouvelles technologies dans l'environnement bâti (senseurs, actionneurs, étiquettes RFID, LED, quick-response codes (QR codes), etc.), ainsi que de développer des tableaux de bord et des logiciels permettant le monitoring de l'habitat et de ses usagers. De plus, le potentiel des réseaux de capteurs pour l'exploration planétaire est reconnu, notamment pour les avantages qu'il offre en termes de fiabilité, de distribution spatiale, de consommation réduite d'énergie (Sanz et al. 2013).

Dans un autre registre, les habitats clos pourraient bénéficier fortement de l'utilisation de matériaux avancés dotés de propriétés hautement performantes par rapport aux matériaux classiques, à l'image de matériaux intelligents réagissant à la dynamique de l'environnement dans lequel ils évoluent. Par exemple, des revêtements autonettoyants pour les vitres et les panneaux solaires utilisant des agents antistatiques à base de nanomatériaux dont la structure moléculaire repousse la poussière et l'eau.

Le programme Oïkosmos pourrait voir se déployer une recherche en matériaux avancés caractérisés par leurs capacités d'adsorption et de distribution de la lumière, d'isolation de matériaux de construction, de stérilisation, de prévention des contaminations de surfaces (biofilms), de processus traitement des déchets (séparation par filtration, piégeage de micropolluants), ou de résistance aux biodétériorations, comme des matériaux composés d'une combinaison de plastique stratifié avec une pellicule d'oxyde d'aluminium (Cooper et al. 2011). À titre d'exemple, les vitres électrochimiques intelligentes capables de contrôler le flux de lumière les traversant, de par une opacité ou une transparence variable, dotée de verres spéciaux (par exemple à base d'oxyde de nobium) composés de minces couches de nanoparticules (cristaux d'oxyde d'indium-étain) prises en sandwich avec des couches contenant un électrolyte (donc

³⁶⁸ De nos jours, les solutions de la domotique sont en constante expansion. Alors que son essor tardait à se confirmer, après avoir été prédit de longue date, il devrait passer d'un marché de niche à un marché de masse à l'horizon 2025, grâce au développement des NTIC et de l'Internet des objets dès les années 2010.

conducteur d'électricité) (Llordés et al. 2013). Ce type de configuration permet une régulation fine de la performance énergétique du bâtiment (énergie consommée pour le chauffage et l'éclairage) selon l'intensité du courant électrique soumis au travers du vitrage.

La recherche pourrait porter également sur le développement : de vêtements et textiles intelligents (« wearable computing ») dotés de fonctionnalités de protection de la santé : T-shirt avec produit anti-allergique, pansement intelligent dont la couleur varie en fonction du pH, etc. ; de matériaux dynamiques (actifs), dont les propriétés changent durant la journée, selon les conditions et les stimulations externes (en fonction de l'ensoleillement, ou des charges qui leur sont appliquées) : matériaux changeant de couleurs ; matériaux autodiagnostiquants basés sur des senseurs optiques indiquant des déformations et imperfections du matériau, par émission de signaux lumineux ou mesurant des champs magnétiques, des vibrations ou des accélérations ; de matériaux mobiles, élastiques, à mémoire de forme, autoassemblant ; ou encore de matériaux biomimétiques (§7.3.1.4).

Une fois développés, optimisés et enfin combinés et intégrés au simulateur d'ECA, de tels matériaux avancés, basés sur les biotechnologies, les micronanotechnologies et les NTIC, semblent à même d'augmenter la faisabilité et la durée de missions Mars, avec d'intéressantes retombées terrestres potentielles dans les domaines de l'habitat durable, intelligent, autonome et/ou écologique.

11 Considérations finales

11.1 Le renforcement de l'intégration au programme Horizon 2020

Dans le contexte économique et géopolitique actuelle, l'Europe a besoin de projets fédérateurs lui permettant de rester leader dans le domaine de la recherche et de l'innovation. Dès lors, il paraît intéressant de relever qu'Oïkosmos concentre de nombreuses thématiques du huitième programme-cadre de recherche de l'Union européenne, Horizon 2020 (H2020)³⁶⁹, avec plusieurs appels à proposition dédiés à l'exploration spatiale incluant les aspects de support-vie ou gestion de l'habitat dans une des sections prioritaires visant à promouvoir le leadership industriel européen dans l'innovation technologique (Section « Leadership in enabling and industrial technologies »)³⁷⁰.

La sous-section Recherche spatiale³⁷¹ d'Horizon 2020 vise à renforcer la compétitivité du secteur spatial européen et aborde largement la préparation au sol des missions habitées d'exploration spatiale, via deux appels à proposition qui semblent en droite ligne avec le champ de recherche de l'écologie industrielle et l'approche synergistique du programme Oïkosmos :

a) « COMPET-7-2014 : Space exploration – Life support »³⁷², dans lequel il est clairement affiché que l'étude des BLSS et des ECA et les démonstrations technologiques lors de la préparation au sol des missions d'exploration interplanétaire doivent permettre de développer des applications terrestres dont pourrait bénéficier les citoyens européens dans les secteurs de la biotechnologie (§8.2), de la nutrition (§8.3), de la production agroalimentaire contrôlée (§8.3.2), de l'écologie industrielle (§6.2), de la santé (§8.2.7), etc.). Cela sous-entend que ces développements doivent passer par le biais de synergies entre les acteurs du spatial et du non spatial.

b) « COMPET-4-2015 : Space exploration – Habitat management »³⁷³, touchant au management de

³⁶⁹ Site web du programme de recherche H2020 : <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-sections>

³⁷⁰ Section « Industrial Leadership » de H2020 : <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/industrial-leadership>

³⁷¹ Section « Space » de H2020 : <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/space>

³⁷² En témoigne cet extrait : « Scope: Prepare for demonstrating technologies, and operations techniques and process, critical for future human missions as well as advancing knowledge related to human spaceflight and terrestrial applications for the benefits of citizens. Proposals demonstrating closed loop regenerative life support system technologies (including for instance modelling of complex microbial or plant-based ecosystem, trace elements, circular dynamic system) for safe production of healthy consumables and in particular food for future manned exploration missions should be proposed to be implemented by leveraging synergies between space and non-space actors (e.g. biotechnology, nutrition, food, controlled agriculture, industrial ecology, health sectors). These on-ground preparatory activities are a prerequisite to potential flight hardware development and activities to be conducted on-board the European Columbus module of the ISS. ». Voir : <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/compet-07-2014>

³⁷³ En témoigne cet extrait : « Scope: Prepare for demonstrating technologies, and operations techniques and process, critical for future human missions as well as advancing knowledge related to human spaceflight and terrestrial applications for the benefits of citizens. Proposals demonstrating safe and reliable quality control of indoor environment in space including microbial control (e.g. development of early detection and warning systems for environmental contamination and pollution) should be implemented by leveraging synergies between space and non-space actors (e.g. industrial ecology, health sectors). These on-ground preparatory activities are a prerequisite to potential flight hardware development and activities to be conducted on-board the European Columbus module of the ISS. ».

l'habitat spatial, ses applications possibles basées sur les systèmes de détection et d'alerte précoce de contamination et de pollution (§7.3.3.2.b) également via des synergies entre communautés terrestres et spatiales dans les secteurs de l'écologie industrielle et de la santé.

Ajoutons que deux « appels à propositions » du volet de H2020 consacrés aux biotechnologies³⁷⁴ (« Call H2020-BIOTEC-2014/2015 ») semblent pertinents pour Oïkosmos. Il s'agit de : « BIOTEC 5 – 2014/2015 : SME-boosting biotechnology-based industrial processes driving competitiveness and sustainability »³⁷⁵, avec des applications dans les domaines du bioraffinage (voir §7.4.4) ; et « BIOTEC 6 – 2015 : Metagenomics as innovation driver »³⁷⁶, avec des applications basées sur les technologies omiques dans les domaines de l'assainissement de l'eau, de l'agroalimentaire, de la pharma (voir §8.3.3).

De plus, il est suggéré ici d'intégrer d'autres thématiques terrestres d'Oïkosmos au programme H2020. On peut d'ailleurs considérer que la soumission de la proposition « Modelling, Analysis, Stability and Safety of Terrestrial Ecosystem-based waste Recycling loop » présentée au §7.4.2.2 représentait précisément une démarche allant dans ce sens dans le cadre du précédent programme-cadre de recherche de l'UE (FP7).

Dans une autre section prioritaire d'H2020 consacrée à l'élaboration de réponses aux défis sociétaux en matière de santé, d'évolution démographique, de bien-être, d'agriculture durable, d'utilisation efficace des ressources³⁷⁷, le volet « Climate action, environment, resource efficiency and raw materials » est composé d'appels à propositions présentant des similarités avec le programme de recherche Oïkosmos, à l'image des appels à proposition:

a) « Waste: A Resource to Recycle, Reuse and Recover Raw Materials » (connexion avec §7.4) : « WASTE-2-2014 : A system approach for the reduction, recycling and reuse of food waste »³⁷⁸ ; « WASTE-6-2015 : Promoting eco-innovative waste management and prevention as part of sustainable urban development »³⁷⁹ ; et « WASTE-7-2015 : Ensuring sustainable use of agricultural waste, co-

Voir : <https://ec.europa.eu/info/funding-tenders/opportunities/portal/screen/opportunities/topic-details/compet-04-2015>

³⁷⁴ La biotechnologie est un des volets de la sous-section « Nanotechnologies, Advanced Materials, Advanced Manufacturing and Processing, and Biotechnology » de Horizon 2020 :

<http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/nanotechnologies-advanced-materials-advanced-manufacturing-and-processing-and>

³⁷⁵ Description du proposal « BIOTEC 5 – 2014/2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2547-biotec-5a-2014-1.html>

³⁷⁶ Description du proposal « BIOTEC 6 – 2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2600-biotec-6-2015.html>

³⁷⁷ Section « Societal challenges » de Horizon 2020 : <http://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/h2020-section/societal-challenges>

³⁷⁸ Description du proposal « WASTE-2-2014 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2112-waste-2-2014.html>

³⁷⁹ Description du proposal « WASTE-6-2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2116-waste-6b-2015.html>

products and by-products »³⁸⁰.

b) « Water Innovation: Boosting its value for Europe » : « WATER-1-2014/2015 : Bridging the gap: from innovative water solutions to market replication »³⁸¹ (connexion avec §7.4.2.2).

Le volet « Food security, sustainable agriculture and forestry, marine and maritime and inland water research and the bioeconomy » inclut des propositions liées aux systèmes de production alimentaires durables, en lien avec Oïkosmos, à savoir : « SFS 8 - 2014/2015 : Resource-efficient eco-innovative food production and processing »³⁸²; et « SFS 17 - 2014/2015 : Innovative solutions for novel food processing »³⁸³ (connexion avec §8.3.1.3).

Avec le large spectre de thématiques que couvre son agenda de recherche, il n'est pas surprenant que le programme Oïkosmos cible adéquatement plusieurs de celles abordées par le non moins vaste programme de recherche Horizon 2020. Reste aux partenaires académiques et privés à profiter des montants significatifs qu'il offre pour approfondir les connaissances dans ces domaines connexes aux systèmes clos.

³⁸⁰ Description du proposal « WASTE-7-2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2115-waste-7-2015.html>

³⁸¹ Description du proposal « WATER-1-2014/2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/calls/h2020-water-2014-two-stage.html>

³⁸² Description du proposal « SFS 8 - 2014/2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2541-sfs-08-2014-1.html>

³⁸³ Description du proposal « SFS 17 - 2014/2015 » :

<http://ec.europa.eu/research/participants/portal/desktop/en/opportunities/h2020/topics/2331-sfs-17-2014.html>

11.2 Les aspects éthiques de la vie en habitat clos

Malgré certains comportements à risque (alcool, tabac, hygiène alimentaire, sédentarité, etc.) de bien des citoyens européens (§6.1.2), nombre d'entre eux considèrent désormais comme un dû la prolongation de leur vie, qu'il convient de pérenniser à tout prix grâce aux systèmes de santé dont ils participent activement au financement. D'un autre côté, une proportion croissante de la population européenne tente d'améliorer sa santé par une alimentation strictement contrôlée et des activités sportives aussi fréquentes qu'intenses. Afin d'atteindre leurs objectifs et de rester motivés dans leur démarche, ils se bardent par exemple de capteurs et utilisent pléthore d'applications sur téléphones portables ou montres connectées pour monitorer leur alimentation, leur sommeil et leur performance sportive (§6.4.2), et vont même parfois jusqu'à absorber des substances dopantes. En parallèle, une performance psychique individuelle (intellectuelle, cognitive, gestion des émotions) est devenue quasiment un prérequis aux yeux de bien des employeurs (§9.4.3.4), tout comme la haute productivité de leurs employés, même en situation de stress. Enfin, au niveau de la vie privée, l'homme occidental moderne est souvent la victime d'une course sans répit qui consiste à démultiplier les achats matériels, ainsi que le nombre de relations sociales, d'activités culturelles et de loisirs (lectures, restaurants, voyages, etc.). Autant d'occupations à mener en parallèle à leur vie familiale et à leurs projets professionnels. Pour beaucoup, l'horizon ne se focalise plus uniquement sur la recherche du bien-être, mais sur l'optimisation de soi afin de pouvoir se sentir vivre pleinement, qui peut même pousser certains individus à aller jusqu'à une certaine forme d'intensification de soi lors d'activités sportives extrêmes pour ne donner qu'un exemple.

Or, il a été précisément mis en avant tout au long de la présente étude, qu'afin d'assurer la faisabilité et le succès d'une future « mission Mars », les campagnes de simulation exigeront précisément d'avoir une « santé de fer » si ce n'est pas une forme d'« hyperperformance » des membres de l'équipage. Ces derniers devront exercer de manière rigoureuse nombre d'activités au quotidien sur de longues périodes (de quelques mois à plusieurs années). Activités planifiées et contrôlées, elles seront en outre caractérisées par des exigences supérieures à la moyenne ou dépassant les standards habituels du monde du travail. En particulier, un simulateur d'ECA devra chercher précisément à établir un compromis entre 1) la maximisation de la santé de l'équipage ; 2) le maintien de sa performance intellectuelle et physique pour ses activités opérationnelles ; 3) la conservation d'une dynamique de groupe propice au travail d'équipier, au processus de coopération et de cohésion ; 4) l'optimisation du temps des membres de l'équipage, de sorte à assurer le bien-être à long terme d'une communauté restreinte, malgré les contraintes en présence.

Dès lors, faut-il poser des limites à cette maximisation de la performance et de la santé de l'équipage d'un habitat spatial clos ? Si l'on questionnait les transhumanistes et autres aficionados du développement de l'*humain augmenté*, ces derniers envisageraient probablement des solutions « améliorant » certaines fonctions du corps humain pour s'adapter aux conditions draconiennes des

environnements extraterrestres. A l'image des « cyborgs » préconisés par Clynes et Kline (Clynes & Kline 1960), capables d'étendre les possibilités métaboliques ou physiologiques de l'homme, par exemple via l'incorporation d'appareils exogènes dans son corps. Il ne s'agit pas, comme lors de la pose d'un stent suite à une thrombose, de maintenir la santé d'un individu, mais bien de redéfinir le seuil de certains de paramètres homéostatiques pour qu'il puisse évoluer dans des circonstances où autrement l'humain ne survivrait pas. Clynes et Kline évoquent l'opportunité offerte par le cyborg de « libérer l'homme pour ne plus être l'esclave d'une machine » dont il doit continuellement surveiller et ajuster le fonctionnement pour survivre³⁸⁴. Aujourd'hui, plus de cinquante ans après l'article de Clynes et Kline, on est toujours loin d'un « body hacking » (Fiévet 2012) en ce début de XXI^e siècle. Le développement des ECA vise quant à lui à immerger l'équipage dans un système, certes artificiel sur de nombreux aspects, mais bel et bien vivant, possédant des espèces variées en interdépendance. À défaut de transformer l'homme, l'ECA doit entrer au contraire en symbiose avec lui. Grâce à la kyrielle de capteurs et senseurs en présence, la plupart portés directement par l'homme, la biosurveillance de l'écosystème est déléguée à des équipements fonctionnant largement de manière autonome et alertant l'équipage via des systèmes de détections précoces pilotés par des logiciels et algorithmes performants.

Relevons que l'application de principes d'éthiques humaines fait partie intégrante des standards de santé pour les vols spatiaux de longue durée. Alors qu'une récente étude de la National Academy of Sciences et de la NASA indique que les risques pour la santé des missions Mars excèdent les limites actuelles de l'institution (Kahn et al. 2014), ces principes recommandent que toutes décisions prises dans le cadre de ces missions incluent les principes d'éthiques suivants: éviter la douleur, balance favorable entre risque et bénéfique, respect de l'autonomie des astronautes dans le choix des missions auxquelles ils souhaitent participer, équité de traitement au sein de l'équipage et fidélité de la relation entre la NASA et l'astronaute.

Il semble donc approprié que le programme Oïkosmos s'intéresse aux enjeux éthiques des campagnes de simulation et des missions Mars. Il s'agira par exemple de questionner si une telle valeur de performance dans les conditions particulières d'un habitat clos peut être promue à l'échelle de la société européenne par les porteurs du projet, à savoir les décideurs des agences spatiales, les politiques, les scientifiques et les industriels impliqués dans sa mise en œuvre. Ceci indépendamment de la tenue ou non d'une mission effective.

Dans la perspective d'Oïkosmos, il paraît judicieux de questionner les aspects et valeurs éthiques sous-jacentes à la vie en habitat clos, dont les thématiques de recherche comprennent :

³⁸⁴ Lire à la page 27 de la publication à l'origine du terme « cyborg » (Clynes & Kline 1960) : « If man in space, in addition to flying his vehicle, must continuously be checking on things and making adjustments merely in order to keep himself alive, he becomes a slave to the machine The purpose of cyborg [is] (...) leaving man free to explore, to create, to think, and to feel. »

◇ Les investigations sur les enjeux d'éthique humaine dans les conditions extrêmes d'un ECA :

- Quelle signification donner à la vie en système clos pour la nature humaine ? Quelle est sa désirabilité ? Quelle est sa finalité ?
- Quelles leçons tirer de la représentation d'un homme pleinement intégré à l'environnement et aux autres organismes de l'ECA ?
- Quelle est la pertinence de l'amélioration de la santé et de la maximisation de la performance humaine d'un équipage enfermé volontairement et exposé aux conditions que présuppose la vie extrême en habitat clos (confinement, isolation, etc.) sur de longues périodes (plusieurs mois à années) ? Quelles sont ses limites ?
- Quelles sont les finalités sous-jacentes au projet – et communément acceptée comme étant des valeurs éthiques –, en termes d'autonomie, de bien-être physique et psychologique, d'acceptation de ses propres limites ?
- Quelle légitimité donner aux activités du programme Oïkosmos ? Peuvent-elles se justifier par les retombées scientifiques et technologiques découlant des ECA comme : l'accroissement et l'approfondissement des connaissances et du savoir scientifique en biologie, en écologie, en environnement, en médecine, en ingénierie, etc. ; l'industrialisation d'applications utiles à la société, comme des systèmes de recyclage hautement efficaces ; l'expansion des territoires explorés par l'homme (conquête de l'univers), de la découverte de nouveaux espaces ; ou la foi dans l'idée de progrès technique et technologique qui caractérise l'homme moderne ?
- Peut-on combiner les notions sous-jacentes à la vie en habitat clos telles que le besoin essentiel d'un point de vue physiologique, la recherche d'une « bonne vie » (heureuse, épanouissante, confortable, etc.), et la durabilité et résilience d'un système clos ?

◇ Les investigations sur des enjeux d'éthique de l'environnement et des considérations de bioéthique :

- Quels sont les rapports entre les actions de l'homme sur les organismes vivants et sur l'environnement de l'ECA ?
- Quelle est la désirabilité de franchir de nouvelles frontières dans la manipulation du vivant et dans une artificialisation de la nature poussée à l'extrême ? Quelle est sa finalité ?
- Quel est le statut moral des êtres vivants et des espèces de l'ECA, statut qui pourrait éventuellement avoir une implication sur leur usage dans le cadre de ce projet ?
- Quelle est la légitimité de l'usage des principes de prévention et de précaution pour l'étude des organismes de l'ECA ?
- Quelle légitimité donner au développement et à l'utilisation éventuels d'organismes génétiquement modifiés grâce aux outils de la biologie synthétique dans un ECA ?

11.3 Les applications terrestres en relation avec l'étude des ECA

Les écotecnologies sont souvent présentées comme permettant d'accroître l'efficacité environnementale des activités économiques. D'une manière générale, l'efficacité fait un peu figure de panacée pour assurer la transition écologique de nos économies. Malheureusement, rien n'est moins sûr. En effet, comme l'ont montré de nombreuses études empiriques, l'augmentation de l'efficacité des procédés industriels ne se traduit pas automatiquement par des économies d'énergie et de ressources en valeur absolue. Certes, l'accroissement de l'efficacité diminue la quantité d'inputs (matière, énergie) pour produire un bien, mais elle a tendance à favoriser l'augmentation de la consommation de ce bien, ce qui peut se traduire en fin de compte par un accroissement de la consommation de ressources et des impacts environnementaux. Ce phénomène, connu sous le nom d'« effet rebond », doit être pris au sérieux dans le contexte du développement d'écosystèmes et d'habitat clos. Il serait donc judicieux d'intégrer cette problématique, en vue de démontrer les limites de l'efficacité, et d'assurer une vision globale sur l'ensemble des aspects associés aux systèmes clos (voir à ce sujet le §7.2.6 sur les indicateurs de la durabilité systémique).

Pour tenter d'y voir plus clair dans la rhétorique des « cleantech », l'écologie industrielle offre une perspective intéressante pour développer des écotecnologies et des instrumentations pour gérer les ressources et valoriser les déchets (Erkman & Besson 2011). En particulier, ses méthodologies telles que l'analyse des flux de matières et l'analyse de cycle de vie (qui quantifie les impacts potentiels), permettent d'évaluer les performances de l'ensemble des procédés et des technologies (§6.2.2), considérés ou non comme « propres ». Il est également possible d'apprécier les performances des écotecnologies non seulement aux étapes de la production, mais aussi sur la totalité du cycle de vie des produits, en incluant les phases d'utilisation, d'entretien, et de fin de vie. Cependant, les écotecnologies apparaissent comme un aspect certes important, mais partiel, des dynamiques technologiques qu'il convient de favoriser pour optimiser l'écosystème industriel.

La plupart des domaines concernés par le recyclage ont fait des progrès notables, mais leurs interactions ont peu progressé par manque de projet unitaire « sérieux ». L'élimination à grande échelle des déchets a parfois consisté à transformer une pollution en une autre par « effet rebond » et à utiliser la dilution comme moyen apparent d'élimination. Le recyclage apparaît maintenant comme une nécessité et prendre le cas difficile d'un environnement à capacité de rétention très réduite comme les ECA est certes un projet ambitieux, mais dont le caractère interdisciplinaire amènera probablement à des ruptures technologiques qui bénéficieront à chaque discipline.

L'enjeu fondamental concerne ce que l'on peut appeler la « transition écologique » du système industriel (au sujet de cette écotransition, voir §6.2.3). Dans ce processus global, il s'agit de rendre l'ensemble des activités économiques compatibles avec l'environnement, de sorte que, directement ou indirectement, toutes les technologies soient concernées, pas seulement les cleantech. C'est donc bien l'ensemble des

technologies utilisées dans le système industriel qui doivent contribuer à optimiser les flux de matière et d'énergie.

C'est précisément ce qui rend le simulateur d'ECA pertinent, en tant que plateforme technologique interdisciplinaire (§16) vers lequel il semble pertinent de faire converger des trajectoires technologiques apparemment déconnectées. Par exemple, la conjugaison de la triple évolution de l'écologie industrielle (§6.2 et §7), des sciences omiques (§6.3 et §8) et des nouvelles technologies de l'information et de la communication (§6.4 et §9) positionne les ECA à l'interface de dynamiques technologiques variées. Leurs combinaison, articulation et intégration permettraient d'envisager de nouvelles applications, voire de véritables changements de paradigme (dont certains sont réalisés ou en cours), en particulier pour le maintien de la santé ou l'amélioration de la performance environnementale.

Dans ce contexte, l'approche de l'écologie industrielle permet d'aborder les enjeux du recyclage avec une vision plus large que celles offertes par les simples « cleantech », et d'envisager l'intégration aux ECA de la problématique des technologies dites disruptives, critiques ou pivotales, qui pourraient se développer à partir d'une ou plusieurs des technologies suivantes :

- les technologies de valorisation à une échelle « industrielle », telles que : la valorisation chimique et biochimique du CO₂ (§7.4.3) ; et le bioraffinage (§7.4.4) ;
- les (nouvelles) technologies de l'information et de la communication, à l'image : des technologies embarquées, avec le développement de capteurs intelligents, connectés, autonomes et ultra-efficaces (§9.3) ; et de l'informatique (mobile) ubiquitaire, avec le développement d'applications mobiles de télésanté (§9.4) ;
- les matériaux avancés, dotés de caractéristiques, propriétés et fonctionnalités supérieures et hautement performantes, y compris ceux produits par des procédés faisant appel aux nanotechnologies ou en biotechnologies (§10.6).

L'ensemble de ces « enabling technologies » englobe de nouveaux procédés, de nouvelles techniques ou de nouveaux matériaux qui proposent des fonctionnalités non disponibles à ce jour, permettant de développer des applications nouvelles. Oïkosmos pourrait avoir une belle carte à jouer dans leur développement.

Avec un tel projet de simulateur d'ECA, l'ESA aurait l'opportunité de développer et déployer un programme de recherche particulièrement vaste. Ce grand projet donnerait nécessairement un rôle majeur au recyclage de chacun des composants du support-vie. Mais, comme nous l'avons suggéré, il irait bien au-delà des aspects liés à l'ingénierie des ECA. De façon pertinente, le programme de recherche pourrait incorporer et englober des thématiques connexes aux ALSS et aux thématiques proposées ci-dessus, comme la biologie systémique, les technologies médicales, la télésanté, la psychologie, etc. Si toutes ces matières, disciplines et autres technologies ont fait ces dernières décennies

des progrès remarquables, leurs interactions en milieu clos n'a toutefois pas reçu toute l'attention nécessaire. Ceci s'explique en partie par le manque d'un site expérimental significatif, présentant à la fois les caractéristiques et l'environnement adéquats, tout en opérant sur des bases scientifiques solides.

En conclusion, un programme tel qu'Oïkosmos, mené au sein d'un simulateur d'ECA facilitant les synergies de recherche, pourrait ainsi permettre à terme de répondre à de nombreuses problématiques terrestres, à l'image de celles illustrées dans la Partie II. La Figure 19 résume les principales thématiques couvertes dans la deuxième partie du rapport qui forment le cœur du programme de recherche scientifique et technologique Oïkosmos. Ensemble et en complémentarité, elles participeront au pilotage et à la surveillance des organismes et de l'environnement au sein d'un simulateur d'ECA. Ces synergies de recherche sur les ECA accéléreront la préparation au sol de missions interplanétaires habitées, et ultimement, elles assureront leur faisabilité et on l'espère leur succès effectif.

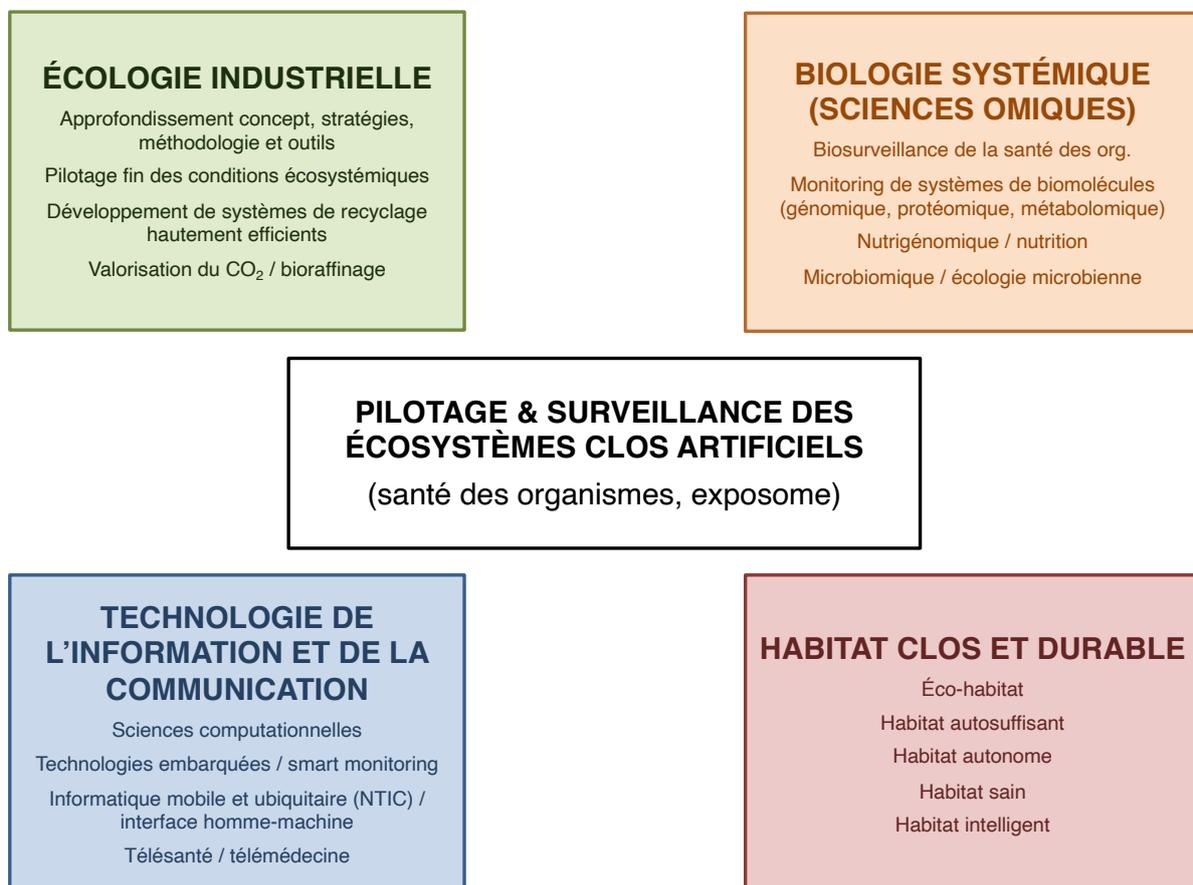


Figure 19: Résumé des thématiques de recherche synergiques sur les ECA abordées dans la Partie II du rapport.

En parallèle, les synergies de recherche permettront l'établissement de nombreuses collaborations avec des institutions du non spatial. En promouvant le transfert de technologie de la recherche académique sur les systèmes clos vers l'industrie, le programme Oïkosmos laisse présager de nombreuses retombées

terrestres directes en termes d'applicatifs et solutions innovantes, pour le bénéfice du citoyen européen. Avec la vaste portée de son agenda de recherche, le simulateur d'ECA laisse présager le développement d'outils, technologies et solutions efficaces et utiles pour améliorer la vie en habitat clos et en milieu confiné, avec des champs d'applications aussi variés que ceux du recyclage et valorisation des déchets organiques, du monitoring de l'environnement, du biosensing de paramètres physiologiques, du bioraffinage, de la production d'aliments fonctionnels, etc.

Nous avons vu par exemple, qu'un aspect intéressant des ECA est leur capacité de recycler les déchets organiques tels que l'urine humaine, en récupérant les nutriments et en dégradant les micropolluants qu'elle contient. Comme la contamination microbienne représente un enjeu majeur, un système de recyclage de l'urine, à la fois hautement efficace, sécurisé et testé dans un système quasi-clos représenterait une éco-innovation extrêmement importante dans le domaine du recyclage décentralisé des eaux usées. Cette technologie pourrait avoir de nombreux applicatifs terrestres, dans la perspective de l'écologie industrielle.

Pour terminer, et afin de donner une vision d'ensemble, la Figure 20 expose les principales applications discutées précédemment dans la Partie II du rapport pour les domaines de l'écologie industrielle, de la biologie systémique, des TICs et de l'habitat clos et durable. Des applications utiles en fin de compte tant à l'amélioration de la santé des citoyens européens, qu'à celle de leur qualité de vie, et de leur environnement.

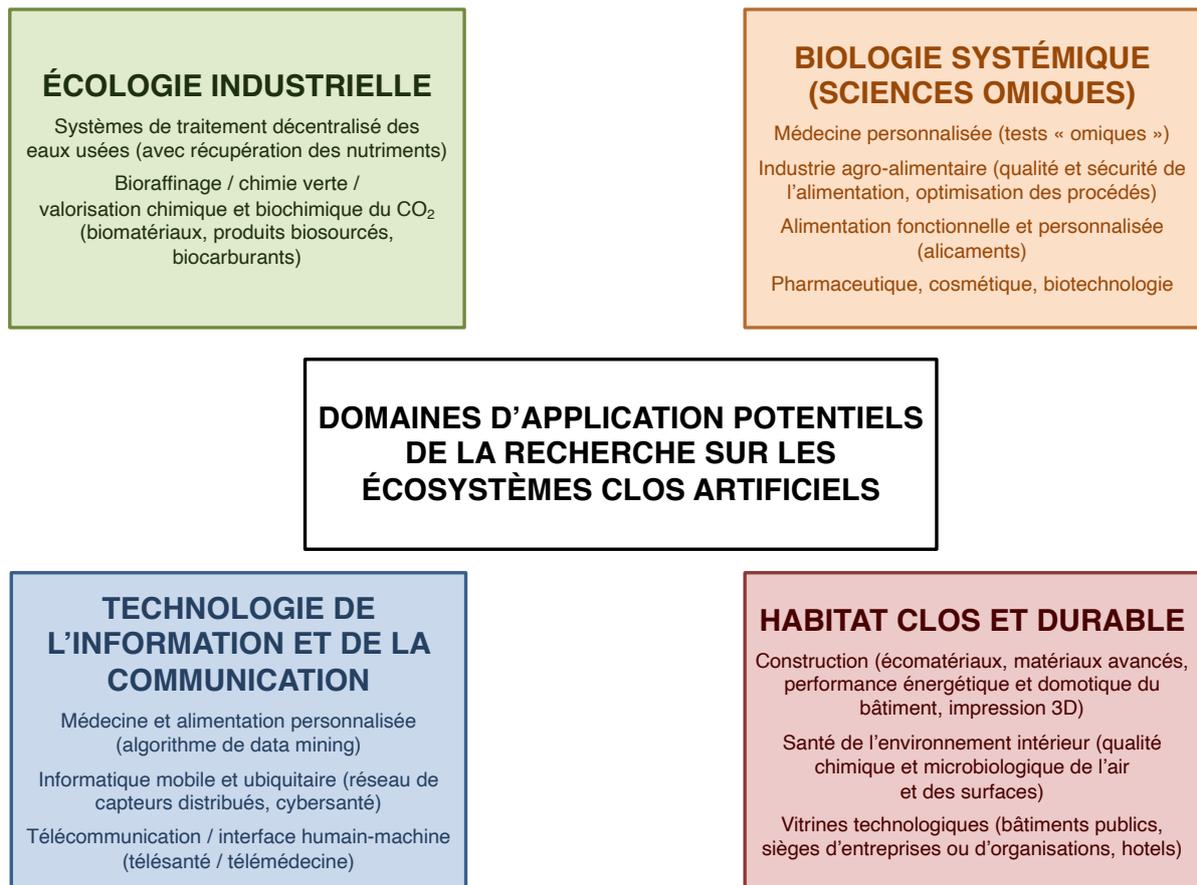


Figure 20: Domaines d'application potentiels qui pourraient jaillir d'une recherche synergistique sur les ECA, et leur contexte d'utilisation.

Écologie industrielle

✧ *Systèmes de traitement décentralisé des eaux usées (physico-chimiques et bactériens). Systèmes de recyclage hautement efficaces des déchets organiques (meilleur rendement, décomposition et productivité) couplés à la production d'engrais par récupération des nutriments contenus dans l'urine, systèmes d'ultrafiltration et de nitrification, de traitement (industriel) des eaux grises ou lisier, toilettes à séparation. Utilisation de cyanobactéries pour le traitement des eaux jaunes et grises. Contexte d'utilisation / lieu d'application: infrastructures urbaines, quartiers résidentiels, zones industrielles, grands événements culturels et sportifs, complexes hôteliers ; habitats isolés: habitats insulaires, cabanes de montagnes, bases (ant)arctiques, navires, bunkers ; équipements pour des interventions en cas de catastrophes naturelles.*

✧ *Bioraffinage / chimie verte / valorisation chimique et biochimique du CO₂. Biomatériaux : biopolymères ; fibres végétales et biosolides utilisés comme briques et matériaux de construction (bâtiments, routes), plastiques biodégradables. Nouvelles voies de dégradation des fibres végétales. Utilisation de cyanobactéries pour la régénération de l'air. Produits bio-sourcés : intermédiaire pour la synthèse de produits chimiques (solvants, lubrifiants, pâtes, etc.) pour l'industrie (cosmétiques, pharma, plasturgie, métallurgie, etc.). Biocarburants de troisième génération à partir de micro-algues.*

Biologie systémique

✧ *Médecine personnalisée : tests « omiques » rapides et bon marché pour l'analyse de la composition génomique (technologies PCR), métabolomique ou nutriginomique d'échantillons biologiques (urine, sang, excréments fécaux, sueur, salive), en vue d'améliorer les diagnostics (détection de maladie) et pronostics médicaux (traitement préventif) ; systèmes de détection hautement sensibles (métabolites toxiques, hormones, médicaments, microbes, virus, prions, etc.) via des capteurs mesurant des données physiologiques.*

✧ *Alimentation fonctionnelle et personnalisée : compléments alimentaires (y compris cyanobactéries), alimentation nutriginomique (aliments, nutraceutiques, nutriments fonctionnels), aliments renforcés, biofortifiants (y compris: élevage d'animaux et les cultures agricoles). Tests de toxicité (contrôle microbiologique des nutriments basés sur le génotypage de micro-organismes). Développement de single-cell-protein aux propriétés bioactives (p. ex. anti-cholestérol)*

✧ *Industrie agroalimentaire. Qualité et sécurité de l'alimentation: procédés de traitement industriel, contrôle qualité (tests d'évaluation de la qualité microbiologique des aliments via technologie omique, p. ex. pour la détection et la caractérisation d'ADN et de protéines), amélioration de l'étiquetage pour le consommateur. Procédés de biologie industrielle améliorant l'efficacité (photo-)bioréacteurs ; procédés agro-industriels de culture optimisant la productivité de chambres de cultures végétales. Systèmes de production de nourriture super efficaces: serres automatisées, miniaturisées optimisant le volume (fermes verticales) et/ou fonctionnant en système clos en conditions sous fortes contraintes (température, volume, etc.), basées sur systèmes hydroponiques, aéroponiques, aquaponiques. Enrichissement des sols (fertilisation avec des coproduits). Systèmes de production locale de micro-algues. Alimentation basée sur la viande synthétique ou sur les insectes. Production de boissons : biosenseurs monitorant la biomasse immobilisée (industrie du vin mousseux). Systèmes d'éclairage de (photo)bioréacteurs (éclairage 3D) basés sur des réseaux de fibres optiques.*

✧ *Pharmaceutique, cosmétique, biotechnologie. Nouveaux protocoles de tests des effets de molécule bioactives (alicament, médicament, probiotiques, polluant) sur les écosystèmes ou sur le métabolome ou le nutrignome humain. Lutte contre la malnutrition basée sur des micro-organismes. Monitoring rapide de l'air et de la surface pour garantir la sécurité de produits pharmaceutiques (vaccins).*

Technologie de l'information et de la communication

✧ *Médecine et alimentation personnalisée : algorithmes pour le data mining de données environnementales et de santé.*

✧ *Informatique mobile et ubiquitaire. Réseau de capteurs distribués mesurant des données environnementales de manière décentralisée : microsystèmes de détection précoce de polluants dans l'air et dans les eaux (traçabilité de composés chimiques et biologiques indésirables, bioindicateurs) ; technologies embarquées: systèmes de reconnaissance faciale et de mouvements (sensing de comportements et d'interactions sociales). Logiciels de recommandations personnalisées selon les profils des utilisateurs (allergies, asthme), en fonction de la localisation et de l'analyse de signatures omiques, etc. (cybersanté). Vêtements et textiles intelligents (« wearable computing ») : médecine de la performance, milieux du sport (fitness, entraînement), ingénierie de la réhabilitation orthopédique, soins médicosociaux à distance, informatique vestimentaire appliquée à la rééducation physique, au sport de haut niveau, à des métiers à risque).*

✧ *Télécommunication / interface humain-machine. Nouvelles procédures et interfaces de télésanté et télémédecine : téléconsultation, télésurveillance, téléassistance médicale (télésoins, robotique médicale), ainsi que téléformation biomédicale. Interfaces homme-machine (réalité augmentée, téléprésence, industrie du divertissement); santé mobile et connectée (mHealth).*

Habitat clos et durable

✧ *Construction. Écomatériaux, matériaux avancés (membranes pour structure gonflable). Architecture et matériaux améliorant la performance énergétique du bâtiment et de ses installations ; appareils de surveillance du bâtiment, mesure de changements hygrothermiques dans un environnement contrôlé (tests d'isolation, inspection d'équipements à distance) ; systèmes d'éclairage artificiels et naturels, détecteur de lumière ambiante (sensing de couleurs) ; appareillages de domotique (basés sur les gestes, le mouvement des yeux, etc.), détecteur de chute pour les personnes âgées, etc. Impression 3D : nouvelles techniques d'impression 3D de composants structurels de bâtiments, ou de bâtiments entiers, avec aide robotisée ou de manière partiellement automatisée. Équipements ergonomiques optimisant le confort et l'habitabilité. Panneaux photovoltaïques adaptés aux milieux hostiles (déserts, îles solaires, pare-avalanches, etc.).*

✧ *Santé de l'environnement intérieur. Systèmes de purification de l'air intérieur et de détection de (bio)contamination sur les surfaces (hygiène hospitalière, contrôle qualité en industrie pharmaceutique), stérilisation de salles blanches (prise en charge de patients immunodéficients), couvertures antibactériennes.*

✧ *Vitrines technologiques (habitats clos) : bâtiments publics, sièges d'entreprises ou d'organisations, etc.*

PARTIE III : LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL : UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

La première partie de ce rapport a démontré la pertinence d'une installation terrestre dédiée à la préparation au sol des missions humaines vers Mars, en particulier pour son intérêt en tant que : « analogue spatial », pour tester la mission dans les conditions les plus réalistes ; « simulateur d'ECA » pour effectuer tant des recherches purement terrestres que synergistiques ; et « simulateur d'habitat clos » permettant de se préparer et de s'adapter à un futur plus contraignant, présentant des conditions toujours plus similaires à celles que l'on peut rencontrer dans les systèmes spatiaux. L'ensemble de la deuxième partie a illustré quel programme de recherche pourrait être conduit au sein d'une telle infrastructure.

Un simulateur d'ECA n'a pas pour vocation d'être un projet exclusivement académique. L'implication du monde économique et de la société semble nécessaire au bon fonctionnement à long terme du programme Oïkosmos. La finalité duale d'un simulateur d'habitat clos, à la convergence du terrestre et du spatial, devrait naturellement le positionner comme une « structure ouverte » aux coopérations interinstitutionnelles et aux échanges avec la société.

En complément de son intérêt scientifique, la troisième partie de ce rapport envisage le simulateur d'ECA comme plateforme technologique à même de catalyser les processus d'éco-innovation et d'accélérer le transfert de savoir et de technologie lié aux écosystèmes et aux habitats clos. Il s'agit par exemple de réunir les conditions favorisant tant l'établissement de synergies de recherche terrestres et spatiales que le développement d'applications utiles à la société³⁸⁵. Cette partie questionne :

- Quels sont les services qui pourraient proposer aux institutions et aux organisations désirant conduire des projets connexes aux systèmes clos ?
- Comment financer les activités opérationnelles d'un simulateur d'ECA dans le contexte actuel de relative faiblesse des budgets de recherche dans certains pays européens ?
- Comment impliquer les communautés de scientifiques, d'ingénieurs, de médecins, mais aussi d'industriels et de professionnels de l'innovation évoluant traditionnellement hors du domaine spatial ?
- Comment bâtir des ponts entre les nombreuses disciplines de l'agenda de recherche Oïkosmos tout en s'assurant que les collaborations et les interactions de spécialistes d'horizons divers puissent être efficaces et productives sur le long terme ?

³⁸⁵ Rappelons encore que le projet MELiSSA, bien qu'il n'ait pas bénéficié jusqu'ici d'une infrastructure telle que FIPES et sans que l'accent soit mis en premier lieu sur le transfert de technologie, a déjà démontré un potentiel certain pour des applications utiles à la société (en particulier pour le traitement des déchets organiques, voir §4.2.1.5).

Les prochains chapitres esquisseront des réponses possibles à ces interrogations, et conceptualisent les différentes facettes et modalités d'utilisation du simulateur d'ECA en tant que :

- installation flexible et dynamique permettant une mutualisation des ressources physiques (§12) ;
- « Forum » et lieu privilégié de promotion des systèmes clos (§13) ;
- « Centre de compétences » donnant un accès à une expertise complète sur les systèmes clos (§14) ;
- « Incubateur » catalysant les processus d'éco-innovation (§15) ;
- plateforme intégrative favorisant l'interdisciplinarité (§16) ;
- infrastructure servant à pérenniser la recherche sur les systèmes clos (§17) ;
- projet impliquant les citoyens grâce aux sciences participatives et à l'innovation ouverte (§18).

Dans ce contexte, l'installation pourrait devenir l'élément central d'un écosystème de parties prenantes tout au long de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » associée aux systèmes clos, et ainsi une infrastructure de R&D accessible tant à des scientifiques, qu'à des entreprises, des industriels et des citoyens.

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales du rapport

12 Une installation flexible et dynamique permettant une mutualisation des ressources physiques

La problématique des écosystèmes clos est complexe de par la nature même des multiples composants et interactions en présence, et n'est appréhendable que partiellement par modélisation informatique. Les meilleures solutions technologiques ne seront certainement pas systématiquement déployées immédiatement au démarrage des campagnes d'expérimentations au sol. Celles retenues initialement seront amenées à changer en cas d'avancées technologiques majeures, et de nouveaux éléments et compartiments s'ajouteront au fur et à mesure du développement du simulateur d'ECA.

Une stratégie d'intégration des technologies semble indispensable pour accompagner ses évolutions possibles sans pour autant impacter significativement sur la structure et sur les modalités d'exploitation du simulateur d'ECA et générer des bouleversements complets de configuration, des surcoûts et des délais inutiles qui pourraient mettre en péril le projet.

Une fois les grandes lignes du contenu du programme de recherche Oikosmos déterminées, le design des infrastructures du simulateur d'ECA peut être conceptualisé à son tour. En parallèle, les modalités d'accès au démonstrateur pour les chercheurs et les autres parties prenantes doivent être clarifiées, notamment en termes de règlements et de coûts. Le simulateur d'ECA pourrait voir ses laboratoires fréquentés par toute une variété de scientifiques venant en alternance ou postés en permanence sur le site pour coordonner les études menées dans une perspective interdisciplinaire. Dans ce contexte, la plateforme technologique aura tout intérêt à être aussi flexible et évolutive que possible.

Une haute modularité de l'installation favoriserait par exemple l'interopérabilité et l'adaptation régulière selon la dynamique des activités de recherche, elle-même fonction : de l'intégration potentielle de nouvelles espèces impliquant un agrandissement de l'ECA, de la quantité d'expérimentations menées en parallèle, des changements de protocoles expérimentaux, du démarrage de nouveaux développements technologiques, des modifications des technologies de support-vie, de la variation du parc d'équipements des laboratoires, du nombre de participants aux campagnes de simulation, et de l'arrivée d'éventuels nouveaux partenaires ou locataires (chercheurs ou groupes de recherche en visite, start-ups, etc.).

Soulignons qu'un des attraits du projet de simulateur d'ECA pourrait résider dans les modes de participation offerts pour la réalisation de synergies de recherche et de transferts de savoir et de technologie. Les parties prenantes pourraient contribuer au programme Oikosmos de multiples manières, en participant à la conception, au design ou à la construction du simulateur d'ECA, ainsi qu'à son exploitation via des programmes de recherche spatiale ou hors spatial, mais aussi à des transferts de technologies d'applicatifs terrestres et aux développements de la future base planétaire. Il existe donc tout un éventail de modalités d'accès et de participation au simulateur d'ECA, afin que chacun puisse venir y perfectionner son projet propre. Toutefois, il paraît clair à ce stade qu'une agence spatiale comme

l'ESA ne mettra pas à disposition gratuitement un tel site. En d'autres termes si le projet se veut « intégrateur » il faudra qu'il bénéficie d'une stratégie de financement garantissent la pérennité de ses activités.

Un des moyens de rentabiliser les locaux de la plateforme consisterait à mettre en place un système de location de surfaces et d'équipements de laboratoires, afin d'amortir les investissements de l'infrastructure de recherche. La mutualisation de ressources physiques à disposition pourrait intéresser des groupes de recherches académiques, mais également des PME dont la capacité de R&D se limite parfois à un simple responsable, ou alors une petite équipe de R&D aux moyens limités. Ceux-ci pourraient dès lors bénéficier ponctuellement d'un accès à des prix compétitifs aux locaux et équipements de la plateforme, pour des périodes allant de quelques heures à plusieurs semaines, voire plusieurs mois en fonction du type d'expérimentation et de leur complexité. Des start-ups apprécieraient également à coup sûr de pouvoir accroître leur personnel et leurs activités dans un environnement évolutif qui lui éviterait de devoir déménager trop rapidement ou fréquemment. Leur accès aux infrastructures du simulateur pourrait en l'occurrence être financé par leurs investisseurs ou des organismes de soutien à l'innovation. En tant que propriétaire d'une infrastructure comme FIPES, l'ESA aurait la possibilité de louer une partie de ses laboratoires et de son parc d'équipements, lui permettant ainsi de maximiser leur exploitation, en particulier dans les périodes creuses entre les campagnes de simulation. Les utilisateurs (les clients) seraient attirés par une installation à l'état de l'art et modulable selon leurs besoins. L'agence assurerait l'intendance du site – et au minimum la maintenance des équipements –, et pourrait fournir d'autres prestations de service basées sur l'expertise et le savoir-faire sur les systèmes circulaires (voir le §14 sur le centre de compétences).

Relevons que l'implication des partenaires de recherche pourrait se faire également sous financement d'organismes publics nationaux (ex : Fonds national suisse de la recherche scientifique) et européens (Horizon 2020) pour des institutions de recherches public ou privé, sous financement propre d'entreprises et d'industriels ou en sous-traitance de l'ESA pour des laboratoires publics et privés.

En conclusion, si un tel système de mutualisation des ressources devait fonctionner, la flexibilité et le dynamisme de l'installation pourraient créer en retour de nouvelles opportunités de synergies de recherche en mettant à proximité et interfaçant aussi bien des chercheurs de consortium de recherche sur les ECA, que ceux extérieurs à Oikosmos.

13 Le Forum Oïkosmos : un lieu privilégié de promotion des systèmes clos

Plus largement, un « Forum Oïkosmos » axé sur les systèmes clos pourrait s'établir au sein du simulateur d'ECA. Destiné à s'adresser à un vaste public, ce forum interconnecterait des réseaux scientifiques, d'industriels et de citoyens. Il serait un vecteur de dissémination d'informations pertinentes sur les opportunités concrètes du programme Oïkosmos pour tout acteur désireux parfaire ses connaissances sur les systèmes clos ou développer sa discipline propre à l'occasion d'un projet majeur. Les activités du forum seraient complémentaires à celles du Centre de compétences Oïkosmos sur les systèmes clos (§14), et interviendraient généralement en amont. Il pourrait se composer de trois volets : l'Interface Science-Société, la Plateforme Science-Industrie et la Fondation Oïkosmos.

✧ *L'Interface Science-Société*

L'Interface Science-Société du Forum Oïkosmos donnerait la parole aux scientifiques, chercheurs et industriels pour expliquer le rôle des ECA à un large public et servirait de lieu d'échange pour développer des idées et débattre publiquement de toutes questions relatives aux systèmes clos. En conséquence, le dialogue entre les experts, les citoyens, les associations ou toutes autres organisations non actives dans ces technologies serait favorisé, tout comme le démarrage de collaborations ouvertes et de projets d'innovation ouverte. Un des objectifs consisterait à influencer positivement les décideurs – tant politiques, qu'industriels – sur les enjeux et retombées bénéfiques de l'étude des systèmes clos, de sorte à dynamiser les activités du simulateur d'ECA et à recueillir des soutiens (y compris financiers) supplémentaires (voir §23.1 sur la politique scientifique d'Oïkosmos). En renforçant l'intérêt et le soutien public aux activités spatiales, une telle initiative pourrait s'avérer fondamentale pour garantir la durabilité d'un programme à long terme comme l'est Oïkosmos (voir §23.2 sur les aspects de communication et de vulgarisation scientifique).

✧ *La Plateforme Science-Industrie*

De concert avec le Centre de compétences Oïkosmos, la Plateforme Science-Industrie du Forum Oïkosmos pourrait servir de point de rencontre unique entre les scientifiques et les entreprises innovantes et jouer le rôle d'un « business club » qui aurait pour vocation :

Pour les scientifiques et les chercheurs

- d'organiser régulièrement des manifestations sur thématiques spécifiques (par exemple avec des clusters de promotions des technologies) ou des événements annuels présentant des résultats spécifiques ou l'état d'avancement de projet auprès des secteurs privés et publics ;

- d'organiser régulièrement des séminaires et des ateliers avec l'industrie pour illustrer de nouvelles applications ou tester de nouveaux concepts et faire découvrir les compétences de partenaires industriels produisant les hautes technologies et les équipements de pointe nécessaires ou utiles à l'exploitation optimale des ECA ;
- de créer des synergies entre les institutions académiques, les entreprises et les industriels actifs dans les sciences de la vie et de l'environnement, en coordination avec les experts du centre de compétences, afin d'initier des projets de recherche conjoints, y compris sous la forme de partenariats public-privé ;
- d'aider à maintenir des sous-communautés du domaine spatial à une taille critique (par exemple celle des sciences de la vie) ;
- d'améliorer les perspectives de carrières industrielles des chercheurs associés au programme Oikosmos ;
- de favoriser la rencontre avec des investisseurs.

Pour les entreprises et les industriels (start-ups, PME, multinationales)

- de créer une plateforme d'échange de savoir et de bonnes pratiques afin d'améliorer les compétences mutuelles de recherche et d'innovation ;
- de rester à l'écoute ou de participer à la définition des besoins industriels spécifiques à la recherche sur les ECA ;
- de faciliter la production de résultats expérimentaux pouvant être convertis en valeur ajoutée économique, sociale ou technique dans les domaines de l'écologie industrielle, de la durabilité terrestre et de l'économie circulaire ;
- de jouer un rôle de facilitateur et d'aiguilleur vers les experts du centre de compétence afin d'initier des projets industriels conjoints.

✧ *La Fondation Oikosmos*

Dernier volet du Forum, la Fondation Oikosmos rassemblerait des parties intéressées issues de communautés diverses et spécialisées autour de la plateforme technologique au sein d'un « think tank » unique en son genre. Ce groupe de réflexion traiterait de problématiques terrestres et spatiales connexes à Oikosmos. Il serait composé de représentants du Consortium MELiSSA, et ouverte à de nouvelles institutions de recherches et à des acteurs industriels. Cette entité jouerait un rôle complémentaire à la Fondation MELiSSA créée en 2015, et aurait pour mission première de mener des activités visant à :

- favoriser l'émergence d'une vision commune sur les dimensions terrestre et spatiale de la recherche sur les ECA, et se focaliser sur l'analyse des besoins et des compétences européennes

en la matière ;

- promouvoir des idées innovantes et liées à Oïkosmos auprès des parties intéressées européennes, en particulier auprès des politiques, des décideurs et des directions d'institutions de recherche clés ;
- participer à la planification et la coordination du programme Oïkosmos avec ses partenaires internationaux (fixation de priorités et d'objectifs, etc.) ;
- assurer une meilleure coordination entre les acteurs du terrestre et du spatial, par exemple entre l'ESA, les agences spatiales nationales, et les organisations du non spatial impliquées dans le projet Oïkosmos ;
- à terme, piloter une plateforme d'investissement financée par les royalties provenant de licences de propriétés intellectuelles de spin-off du simulateur d'ECA, dont le rôle serait de stimuler et financer en retour le déploiement de synergies de recherche terrestre et spatiale sur les ECA.

14 Le Centre de compétences Oïkosmos : un accès à une expertise complète sur les systèmes clos

Même si le modèle économique exact d'un simulateur d'ECA reste à établir, il paraît souhaitable de le considérer comme une structure capable de générer des revenus, y compris si ceux-ci ne devaient couvrir que partiellement ses coûts d'exploitation. En plus des locaux et du parc d'équipements à l'état de l'art qu'elle pourrait mettre à disposition, cette plateforme technologique en question pourrait se muer en un véritable centre de compétence sur les systèmes clos, mettant à disposition une expertise multidisciplinaire à l'ensemble des parties prenantes de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché relative à Oïkosmos. Son développement pourrait se baser sur un modèle économique similaire à ceux d'institutions comme le Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique (CSEM) à Neuchâtel (§5.2.1.4) et le Swiss Integrative Center for Human Health (SICHH) à Fribourg (§5.2.1.6.e)³⁸⁶, tel que décrit ci-après. Des entreprises novatrices, des industriels, tout comme des chercheurs universitaires et des cliniciens ayant des besoins spécifiques pour des projets R&D pourraient y bénéficier d'un soutien scientifique et technique rapide et professionnel, délivré par une équipe interdisciplinaire de spécialistes des systèmes circulaires, caractérisée par son excellence scientifique et son savoir-faire technique. Parmi les points forts, la parfaite maîtrise des équipements et des laboratoires du simulateur d'ECA le personnel permanent (y compris au niveau des activités de maintenance), ainsi que par une bonne connaissance non seulement des compétences des partenaires académiques, mais également des besoins de l'industrie. L'expertise pointue du Centre de compétences Oïkosmos porterait par exemple sur les domaines de l'écologie industrielle (les cleantech associées aux systèmes de support-vie biologiques, l'ingénierie métabolique liée au traitement des déchets organiques), des sciences de la vie (les sciences omiques appliquées aux systèmes clos), et de l'habitat autosuffisant, ainsi que sur des aspects de santé humaine en habitat clos.

Les prestations proposées par le Centre de compétences Oïkosmos permettraient par exemple :

✧ *aux scientifiques et aux chercheurs*

- d'accéder à des spécialistes hautement qualifiés des domaines clés de l'agenda de recherche sur

³⁸⁶ En Suisse occidentale, de nouveaux modèles de plateforme se sont développés ces dernières années, à l'image du Swiss Integrative Center for Human Health (SICHH) à Fribourg (§5.2.1.6.e), fondé en 2013, qui s'inspire lui-même du modèle de développement des technologies du Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique (CSEM) à Neuchâtel (§5.2.1.4).

De plus, des collaborations interdisciplinaires entre acteurs privés et académiques sont présentes dans la région, comme celles entre le Nutrition Research Center de Nestlé et le Brain Mind Institute de l'EPFL dans la recherche élémentaire en neurosciences de la cognition. Lire le communiqué de presse de l'EPFL du 28.11.2011, « Nestlé et l'EPFL s'allient dans la recherche sur le cerveau » : http://actualites.epfl.ch/newspaper-article?np_id=891&np_eid=68

Aussi, certaines multinationales comme Givaudan investissent jusqu'à 20 % de leurs bénéfices dans la R&D. En 2012, Givaudan a dégagé un bénéfice de près de 1,8 milliard de francs suisses (pour un chiffre d'affaires de 4.3 milliards), dont plus de 400 millions ont été investis dans la R&D, selon le rapport annuel de la société :

www.givaudan.com/staticweb/StaticFiles/GivaudanCom/Publications/Financial/2013/Giv_2012_FYreport_FR.pdf

les systèmes clos ;

- d'être aiguillés vers les partenaires du Forum Oïkosmos ayant les compétences et connaissances les plus adéquates ;
- de développer de nouvelles synergies de recherches sur les systèmes clos ;
- d'obtenir rapidement et directement des réponses orientées « métier » à des demandes techniques diverses dans les domaines de l'ingénierie des systèmes clos ;
- de faciliter le montage de collaboration avec des partenaires industriels, afin d'entamer des programmes de recherches conjoints sur les systèmes clos ;
- d'être encouragés et soutenus dans leur démarche d'entrepreneuriat (création de spin-offs et de start-ups technologiques), favorisant une culture de l'innovation autour du simulateur d'ECA, ainsi qu'au sein des institutions académiques concernées.

◇ *aux entreprises et aux industriels (start-ups, PME, multinationales)*

- de concert avec le Forum Oïkosmos, de bâtir un pont entre l'interlocuteur industriel et l'expert de manière simple (techniquement et administrativement) et pragmatique ;
- d'externaliser (partiellement ou totalement) certaines activités de R&D et de R&Da sur des projets technologiques hautement spécialisés, de manière ponctuelle, lorsque ses acteurs ne disposent pas des compétences à l'interne et que la création d'un poste dédié sur le long terme n'est pas à l'ordre du jour pour : le développement de nouvelles méthodes ; du prototypage rapide ; le (co-)développement de solutions ou de produits commerciaux innovants ; ou l'identification d'éventuels obstacles technologiques, socioculturels, scientifiques, éducationnels, etc.
- de mutualiser des services de soutien à l'innovation : soutien à l'identification de nouvelles opportunités marché et des scénarios d'utilisation pour des technologies émergentes ; établissement sur demande d'études de faisabilité ; support pour des questions relatives au financement, à la propriété intellectuelle, aux licences, à la négociation d'accords, à la rédaction de contrats, etc. (« hotline » sur les technologies liées aux ECA) ; mise en contact avec des partenaires externes (aides aux start-ups, financement, incubateur) ; et offre de formations techniques spécifiques ;
- de tirer profit de l'interprétation et de l'analyse de résultats bruts par des spécialistes du domaine capable de fournir rapidement des résultats consolidés et des retours à haute valeur ajoutée, à des fins de publications scientifiques ou de valorisation commerciale ;
- de (co-)financer des projets de recherche (à l'image de thèse de doctorat) réalisés dans l'environnement du simulateur d'ECA.

L'accès à de tels services permettrait de valoriser des activités de recherches et d'accélérer le transfert de savoir et de technologie de solutions innovantes basées sur les ECA. Les équipements des laboratoires d'un centre d'excellence unique en son genre centraliseraient des ressources coûteuses et concentreraient un savoir-faire sur les systèmes clos. Du point de vue des entreprises, ce centre de compétences servirait de point de départ idéal pour des partenariats privé-public pour des projets de R&D, aboutissant à des situations mutuellement bénéfiques (« gagnant-gagnant »). La plateforme technologique se profilerait comme porte d'entrée unique, un « one stop shop » pour l'étude des systèmes clos permettant d'accéder à une palette de compétences (techniques, juridiques, économiques, etc.) complémentaires à celles offertes par des partenariats académiques classiques.

Globalement, un tel positionnement du Centre de compétences Oikosmos ferait de lui un maillon essentiel du simulateur d'ECA pour la mise au point et le développement de solutions et applications utiles à la société dans la perspective.

15 L'Incubateur Oïkosmos : un catalyseur des processus d'éco-innovation

L'étude des processus d'éco-innovation liés au transfert de technologie et de l'investissement dans des start-ups dans les phases « seed » et « early stage » en Suisse occidentale permet de réaliser : 1) qu'aujourd'hui, la recherche suisse est relativement bien dotée en financement public, ce qui a conduit à l'établissement d'une excellente plateforme technologique à travers les hautes écoles, les universités et les instituts de recherche accessible aux entreprises et aux start-ups ; 2) que les aides publiques de financement permettent aux entreprises et aux start-ups de collaborer avec les laboratoires et instituts de recherche en prenant plus de risque, notamment grâce aux efforts de la Commission fédérale pour la technologie et l'innovation (CTI)³⁸⁷ dans la promotion de l'entrepreneuriat et du développement de jeunes entreprises ; 3) qu'il existe à présent de nombreux démonstrateurs et prototypes démontrant la faisabilité technologique de solutions cleantech. Toutefois, on constate que les start-ups ont parfois des difficultés à lever le financement nécessaire dans l'industrialisation et la mise sur le marché de leur solution, notamment auprès du Venture Capital helvétique, peu enclin à investir dans le *early-stage* (la phase précédente les ventes de la start-up) et moins habitué à s'engager dans les cleantech que dans d'autres domaines d'activités (ICT, pharma) dont les business models sont mieux maîtrisés.

Les chercheurs des laboratoires ayant développé des inventions essaient généralement de les convertir en succès sur le marché en créant une start-up, souvent sans avoir bénéficié d'une réelle expérience hors du monde académique. Pour cette raison, les chevilles ouvrières de ces jeunes spin-offs sont parfois perçues par les industriels et les entreprises comme déconnectées du « monde réel » de l'économie. Un des objectifs sous-jacents du programme Oïkosmos est d'offrir une plateforme technologique bien adaptée à son environnement économique. Dans ce contexte, la stratégie de transfert technologique du programme Oïkosmos aurait intérêt de s'appuyer dès le départ sur un incubateur pour catalyser les processus d'éco-innovation émergeant du simulateur d'ECA et développer des solutions orientées systèmes clos en adéquation avec les besoins du marché. Dès lors, l'accompagnement des start-ups de l'Incubateur Oïkosmos se révélera crucial des premières phases de leur développement jusqu'au prototype et premières séries, puis dans les phases d'industrialisation et de mise sur le marché des produits. Avec son écosystème d'acteurs privés de l'éco-innovation gravitant autour du simulateur d'ECA, l'Incubateur Oïkosmos apportera à ne pas douter une meilleure connaissance des besoins du marché à ses start-ups. Il jouera un rôle d'interface entre les axes de recherches du programme Oïkosmos et les besoins de l'économie et offrira la possibilité aux managers et ingénieurs des start-ups de se confronter avec la réalité du marché et d'améliorer leur compréhension des besoins du marché. Ceci afin d'assurer *in fine* le succès sur le marché d'applications provenant des idées et des résultats de

³⁸⁷ Site web de la CTI : www.kti.admin.ch/?lang=fr

recherche les plus prometteurs du programme Oïkosmos.

Premièrement, les start-ups d'un Incubateur Oïkosmos tireraient avantage d'une infrastructure mutualisant les ressources, comme on l'a discuté au §12. Ensuite, elles bénéficieraient de prestations de coaching, auraient facilement et régulièrement accès à des partenaires, clients ou investisseurs potentiels. Enfin, le site servirait de vitrine du savoir-faire scientifique et technologique « made in Europe ».

◇ *Mutualisation des ressources.*

Conçu sous la forme d'un hôtel accueillant des entreprises établies et doté de son incubateur de start-ups, l'environnement du simulateur fournirait à ses locataires des services multiples et mutualisés, afin de les soulager de l'accomplissement de tâches à faible valeur ajoutée. L'ensemble, avec ses larges espaces de premier ordre adaptés à des activités de haute technologie variées, constituerait un campus industriel favorisant l'innovation.

◇ *Prestations de coaching*

Au sein de l'Incubateur Oïkosmos, les start-ups pourront bénéficier d'un coaching personnalisé via une plateforme de soutien de start-ups *ad hoc*, coaching qui pourrait être porté partiellement ou totalement par l'équipe du Centre de compétences Oïkosmos (§14). Le rôle de cette plateforme s'assimilerait à une structure de développement, de par son expertise et sa maîtrise des procédés et des technologies connexes aux systèmes clos.

Les premières entreprises pourraient être simplement les sociétés filles « spin-offées » des activités du simulateur lui-même et de celles des autres partenaires académiques, publiques et privées impliqués initialement. Dans un deuxième temps, l'écosystème de l'innovation autour du simulateur d'habitat clos attirerait de nouvelles start-ups et des entreprises, qui s'y implanteraient pour bénéficier de l'expertise et des prestations en place. Une fois la taille critique atteinte avec de jeunes pousses à différents stades de maturité, l'incubateur pourrait alors se transformer progressivement en catalyseur des processus d'éco-innovation basés sur un portefeuille de technologies basées sur les ECA.

Au départ, l'intérêt des porteurs de la plateforme et des organes coachant les start-ups reposerait sur une rémunération initiale, par exemple sous la forme de prises de participations dans les sociétés soutenues. En parallèle, l'écosystème environnant renforcerait les moyens de financements des start-ups par le biais de subventions étatiques (en Suisse, il s'agit en particulier d'instruments tels que des chèques à l'innovation de la Commission pour la promotion de l'innovation) pour accélérer l'industrialisation des technologies les plus prometteuses.

◇ *Accès à des partenaires, clients ou investisseurs potentiels*

En parallèle au coaching personnalisé qu'il leur fournirait, l'incubateur donnerait alors aux start-ups un précieux accès à des partenaires industriels et des entreprises, mais aussi à des investisseurs.

1) *Partenaires industriels et entreprises.* Au sein de l'Incubateur Oïkosmos l'accès à des partenaires industriels et des entreprises (notamment ceux participant périodiquement aux activités du Forum Oïkosmos), faciliterait la mise en place de collaborations formelles à travers des projets de recherche conjoints. L'environnement favoriserait la rencontre avec les clients potentiels de ces sociétés technologiques nouvellement créées.

2) *Investisseurs.* Les start-ups ont parfois des difficultés à lever le financement nécessaire à l'industrialisation et la mise sur le marché de leur solution, notamment auprès du Venture Capital. Ce dernier est parfois peu enclin à investir dans le *early-stage* (la phase précédente les ventes de la start-up), et moins habitué à s'engager dans les cleantech que dans d'autres domaines d'activités (ICT, pharma), dont les business models sont mieux maîtrisés. L'incubateur facilitera l'approche avec les milieux financiers (entreprises de capital-risque, business angels, mais également banques, caisses de pension, assurances, etc.) et sera ainsi susceptible d'attirer des investisseurs « terrestres » peu habitués à injecter des fonds dans la thématique des systèmes clos. Au sein d'un tel campus d'innovation technologique, le projet orienté système clos des start-ups pourrait avoir accès plus aisément à de potentielles levées de fonds de la part d'investisseurs privés souhaitant développer de nouvelles technologies. Il favoriserait également la mise en place de mesures incitatives à la prise de risque telles que le cautionnement pour les besoins de « working capital » ou l'établissement d'un système de « matching funds » avec les investisseurs privés, ouvrant la voie à la récolte de soutiens financiers supplémentaires bienvenus.

En catalysant l'établissement de ponts entre recherche et économie par un savant mélange de parties prenantes, l'Incubateur Oïkosmos pourrait représenter un moteur de l'innovation et démontrer la faisabilité économique (application/marché) de solutions émergeant de l'étude des systèmes clos, en effectuant leur déploiement à une échelle raisonnable. Soulignons que ce cadre offert par la plateforme technologique serait propice à la mise en œuvre de ces initiatives de manière partiellement – voire à terme totalement – autofinancées, c'est-à-dire financées par d'autres parties prenantes que celles ayant bâti et exploitant les installations, comme une agence spatiale, dans le cas du simulateur d'ECA tel qu'il est conceptualisé dans le présent travail.

◇ *Une vitrine du savoir-faire scientifique et technologique « made in Europe »*

Trouver et développer des sites pilotes servant de vitrine pour le développement commercial de sa solution est une des stratégies suivies par une start-up, afin de rassurer les partenaires et les investisseurs

quant à leur prise de risque potentiel. Néanmoins, cette étape requiert des moyens financiers souvent importants pour permettre l'industrialisation, l'accès au site lui-même, le support et l'utilisation du pilote par le client, des démarches administratives facilitées et accélérées. Comme discuté précédemment, il semble que l'écosystème autour de la plateforme technologique puisse répondre à ces enjeux. Relevons sur le fait que les acteurs étatiques pourraient jouer un rôle primordial dans ce type de projets. Étant eux-mêmes des acteurs économiques de poids, les États européens membres de l'ESA impliqués dans l'établissement du démonstrateur technologique, le pays organisateur bien entendu, mais aussi ceux y effectuant de la R&D ou ayant conçus des équipements, pourraient mettre eux-mêmes en pratique les mesures qu'ils préconisent au reste de la société : positionner le simulateur d'habitat clos comme vitrine des cleantechs « made in Europe », par exemple dans la construction (bâtiment exemplaire), l'utilisation rationnelle des ressources, les technologies de recyclage, etc. Faire rayonner de telles compétences européennes et le savoir-faire scientifique et technologique continental en matière d'éco-innovation serait à ne pas douter une formidable opportunité pour les pays contribuant au projet, les start-ups elles-mêmes et l'ensemble des parties prenantes de la plateforme technologique. Concrètement, cela consisterait à inciter les administrations (en Suisse aussi bien les administrations fédérales, cantonales que communales) à être les premiers clients des start-ups (directement ou via un partenariat public-privé). Le coût du site-pilote serait alors pris en charge par le client, ainsi que le risque de la première mise en place. Le paiement en amont de l'installation des pilotes des spin-offs du programme Oïkosmos permettrait de financer l'industrialisation de ces solutions. Il s'agirait en outre d'une première étape vers l'établissement de standards de qualité des technologies relatives aux habitats clos.

Dans un deuxième temps, l'intégration dans ses propres infrastructures (en cas d'hébergement du simulateur d'ECA sur le sol helvétique : au sein de bâtiments fédéraux, cantonaux ou communaux, tels que des stades, des écoles, des ambassades, etc.) donnerait au secteur public une visibilité aussi bien nationale, européenne, qu'internationale, démontrant son engagement par l'acte. Avec les systèmes clos comme domaine d'excellence, l'Europe renforcerait sa position de leader dans les technologies propres émergentes, non seulement au niveau de leur promotion, mais également de leur utilisation.

16 Une plateforme intégrative favorisant l'interdisciplinarité

À la lumière des chapitres précédents, il ressort qu'un vaste écosystème d'acteurs semble à même de prendre part à un projet tel qu'Oïkosmos. L'exploitation d'un ECA nécessite la coopération étroite non seulement d'ingénieurs, de biologistes, de chimistes et de médecins, mais également de mathématiciens, de physiciens et d'informaticiens. L'approche intégrative (introduite au §5.1.3.4) du programme Oïkosmos a pour volonté d'intégrer des thématiques et des sujets de recherches liés à l'étude des systèmes fermés dans une perspective « méta », à même d'interconnecter et bâtir des ponts entre les différentes disciplines d'intérêt. La Figure 21 illustre quelques-unes des thématiques de recherche situées précisément aux interfaces de domaines aussi variés que la psychologie, la médecine, le support-vie et la biologie.

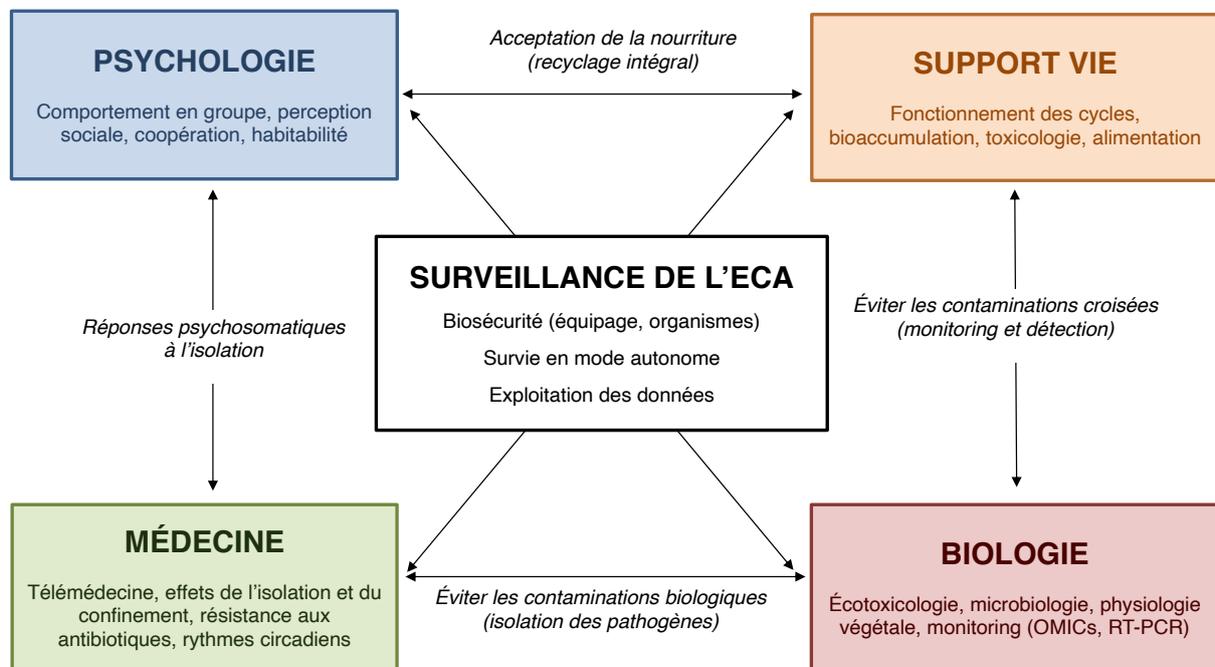


Figure 21: Le programme Oïkosmos: des thématiques de recherches aux interfaces des domaines de la psychologie, la médecine, le support-vie et la biologie.

Une partie des thématiques de recherche du programme Oïkosmos découlent des interactions des aspects des ECA touchant à la médecine, à la psychologie, au support-vie ou à la biologie, pour ne citer qu'eux: transformer ses propres déchets en nourriture pose des problèmes d'acceptation de la nourriture, la vie en habitat clos nécessite un suivi des réponses psychosomatiques à l'isolation et au confinement, la présence de l'homme et de nombreux micro-organismes implique de pouvoir isoler les pathogènes et toutes contaminations croisées entre les compartiments de l'ECA doit absolument être évitée. Source: adapté de C. Lasseur, ESA.

Dans un ce contexte, le programme Oïkosmos et son simulateur associé offrent un potentiel certain pour la conceptualisation la mise en pratique de l'interdisciplinarité, afin d'optimiser les collaborations entre

les chercheurs, ingénieurs et scientifiques, et mieux appréhender les impacts de chacun des aspects des ECA sur les autres.

✧ *La conceptualisation de l'interdisciplinarité*

Selon Edgar Morin, le concept de « discipline scientifique » renvoie à « une catégorie organisationnelle au sein de la connaissance scientifique ; elle y institue la division et la spécialisation du travail et répond à la diversité des domaines que recouvrent les sciences. Bien qu'englobée dans un ensemble scientifique plus vaste, une discipline tend naturellement à l'autonomie, par la délimitation de ses frontières, le langage qu'elle se constitue, les techniques qu'elle est amenée à élaborer ou à utiliser, et éventuellement par les théories qui lui sont propres » (Morin 1994). Une recherche purement « multidisciplinaire » implique des spécialistes provenant de domaines variés et travaillant de manière indépendante vers un même objectif et s'appuie sur la simple juxtaposition de données produites par le travail de chercheurs experts dans leurs domaines respectifs (San Martín-Rodríguez et al. 2005), alors qu'un travail interdisciplinaire peut être considéré comme un processus dans lequel on développe une capacité d'analyse et de synthèse à partir des perspectives de plusieurs disciplines. L'objectif d'une approche interdisciplinaire est non seulement d'identifier, mais également *d'intégrer* toutes les relations entre le savoir, la recherche, et les résultats liés à la problématique étudiée. Il s'agit alors de chercher à synthétiser et de relier ces éléments issus de différentes disciplines en les mettant dans une perspective systémique relativement large (Nissani 1995). L'interdisciplinarité repose sur l'intégration effective des connaissances et de l'expertise de chaque chercheur pour proposer des solutions à des problèmes complexes. Elle concerne les relations entre les sciences, et vise à traiter une problématique scientifique dans son ensemble à partir des points de vue d'expert issus de disciplines différentes.

Il semblerait regrettable qu'un simulateur d'habitat clos doive se satisfaire d'une recherche qui réunit plusieurs disciplines sans chercher à intégrer ou à synthétiser les données et résultats obtenus. Plutôt que de se reposer uniquement sur la multidisciplinarité, la valeur ajoutée d'une telle installation de recherche devrait se fonder sur une approche interdisciplinaire capable d'intégrer les compétences en présence, qui portent sur des aspects variés d'une même problématique, l'étude des systèmes clos.

Une des opportunités qu'offre un simulateur d'ECA réside précisément dans sa capacité à faire co-évoluer un ensemble de disciplines scientifiques et technologiques habituellement étudiées avec une approche que l'on peut qualifier de « réductionniste ». La plateforme de recherche permettrait ainsi de repenser la formation transdisciplinaire, à la convergence de celles des ingénieurs, des scientifiques et des médecins, et à l'interface des sciences de base (mathématiques, physique), des sciences de la vie (biotechnologies), et des sciences de l'ingénieur (écotechnologies, TIC, microtechnologies), en adoptant une démarche « holistique » de sorte à décloisonner la multidisciplinarité et ainsi à favoriser l'interdisciplinarité et ultimement la transdisciplinarité. Concernant la portée de cette dernière, si « multi » consiste en l'assemblage de disciplines variées, « inter » implique les interactions créatives

entre disciplines, alors que « trans » évoque la création de nouveaux domaines de connaissances intégrant des disciplines variées et donc la capacité à transcender les barrières entre les disciplines, ce qui représente un des objectifs principaux du programme Oïkosmos.

Puisque les enjeux environnementaux sont de nature *systemique* (§6.2.3), il conviendrait de garder une perspective globale dans le développement de solutions cleantech issues de la recherche sur les systèmes clos. Dans le contexte de l'innovation technologique et en particulier de l'éco-innovation, il serait approprié de clarifier la définition et la portée des cleantechs et ainsi de mieux les positionner. Il s'agit notamment de mettre en avant le fait que les *écotechnologies* (recyclage de matière, traitement de polluants, etc., voir §7.4.1) ne sont qu'un des éléments nécessaires à la création de valeur et d'inclure dans la définition des cleantechs l'ensemble des technologies qui, comme les nanotechnologies et les biotechnologies, pourraient indirectement contribuer à optimiser les flux de matière et d'énergie. Si les technologies sont importantes, d'autres éléments de la chaîne de valeur permettent d'intégrer les aspects d'interdisciplinarité propres aux cleantechs, résultant en des usages des cleantechs et des modèles d'affaires durables. Plus que dans d'autres domaines d'activités, l'interdisciplinarité peut être ainsi considérée comme une des clés du succès permettant à une application cleantech d'être exploitée sur le marché.

Concrètement, la conceptualisation de l'interdisciplinarité au sein d'un simulateur d'ECA permet d'envisager les synergies de recherches suivantes :

Sociologie des sciences, des techniques, de l'ingénierie et de l'innovation : suivi des processus de collaboration intra- et interinstitutionnelles entre des communautés scientifiques provenant de milieu du non spatial (microbiologiste, écotoxicologue, etc.), et des experts des sciences et technologies spatiales ; identification des critères permettant de faciliter : l'élaboration des nouvelles questions de recherches développement et mise en œuvre de programme de recherches communs et évaluation succès effectif de ces collaborations, d'un point de vue académique et d'un point de vue transfert de technologie ; socio-anthropologie des techniques : études sur les politiques publiques spatiales, sur la participation du public aux choix scientifiques et techniques, sur l'acceptabilité sociale des risques technologiques, sur la gouvernance et les controverses concernant les technologies émergentes.

Philosophie et de l'épistémologie des sciences et des techniques, grâce cette approche à deux niveaux combinant : production de nouvelles connaissances et de nouveaux savoirs scientifiques (en biologie, en médecine, en sciences environnementales, etc.) dans une nouvelle plateforme technologique innovante unique en son genre ; et mise en œuvre d'un processus constant d'autocritique, par lequel le projet sera contrôlé en permanence et dont les significations et les valeurs qu'il englobe seront sans cesse évaluées. Sur cette base, élaboration d'une méthodologie permettant d'appliquer une « science responsable », c'est-à-dire une recherche scientifique qui, au lieu de progresser à l'aveugle et de se pencher sur les conséquences uniquement a posteriori – et donc potentiellement trop tard –, intègre en

amont une dimension à la fois anticipatrice et métacritique, de remise en question constante de ses valeurs et des impacts possibles de ses recherches en systèmes clos pour la société et pour l'environnement.

Étude d'interdisciplinarité en tant que telle : d'une part via l'investigation théorique sur la nature et l'état des lieux de la recherche multidisciplinaire, interdisciplinaire et transdisciplinaire ; et d'autre part l'étude pratique des « processus d'interdisciplinarisation » dans le cadre de démarches concrètes de durabilité, à l'image par exemple du développement de système de recyclage hautement efficient.

❖ *La mise en pratique de l'interdisciplinarité*

Quel acteur de la recherche, fondamentale et appliquée, publique ou privée, ne rêverait pas d'avoir l'opportunité d'exploiter un laboratoire lui permettant de mettre en œuvre les procédures et/ou technologies propres à sa discipline scientifique de prédilection au sein d'une plateforme non seulement multidisciplinaire, mais également interdisciplinaire, dédiée prioritairement à l'intégration même de ses résultats dans des activités de recherche conjointes avec les autres professionnels de la science en présence ?

Même si l'interdisciplinarité est perçue comme un « must » de nos jours, des obstacles subsistent. En effet, si l'approche interdisciplinaire permet de mieux appréhender un sujet dans sa « globalité », elle comporte néanmoins le risque de la confusion et de l'approximation des concepts. Un risque qui est renforcé par le fait que les formations académiques forment généralement des gens hyperspécialisés pour lesquelles l'interdisciplinarité est difficile à intégrer. De leur côté, les grandes entreprises peinent à intégrer l'interdisciplinarité, non seulement par la trop haute spécialisation de leurs cadres, mais également par des organigrammes fragmentés. Quant aux start-ups et PME, c'est en général plutôt un manque de connaissances ou de ressources.

La mise en pratique de l'interdisciplinarité au sein d'une plateforme technologique telle que le simulateur d'ECA semble judicieuse pour approcher des sujets de recherche complexes qui ne peuvent pas être traités de manière satisfaisante avec les approches disciplinaires traditionnelles.

Toutefois, un démonstrateur technologique sur les systèmes clos réunit des disciplines certes fort complémentaires, mais impliquant aussi la réunion de professions peu habituées (voire peu enclin) à travailler ensemble, par manque d'un vocabulaire commun, ou par l'application de technologies et de méthodologies et approches parfois fort dissemblables. Dans le cadre d'Oïkosmos, cela concerne deux des domaines clés des ECA, les sciences de vie et celles de l'ingénieur, dont les confluences s'avèrent parfois difficiles à établir entre les chercheurs respectifs, alors que les deux voies présentent un fort potentiel de transdisciplinarité. Ce constat ne devrait pas freiner l'établissement de collaborations fructueuses sur la problématique des écosystèmes clos, cette dernière étant par essence interdisciplinaire.

Dès la phase de conception et de design du simulateur d'ECA, des architectes et des psychologues pourraient par exemple partager leurs hypothèses et leurs données, en menant à une symbiose fertile pour les deux camps grâce à la complémentarité de leurs approches (Harrison 2009). Les psychologues, en tant que scientifiques, seraient à même d'observer des phénomènes et de tester des hypothèses, avec la panoplie d'outils (échelles d'évaluation, questionnaires...) dont ils disposent, outils utiles pour mesurer les préférences des membres d'un groupe, menant les architectes à un meilleur ajustement empirique. Les architectes auraient quant à eux une vision plus créative, traduisant l'imagination en réalité et feraient ensuite évaluer leur design par les futurs utilisateurs et clients. Une collaboration entre ces deux types d'acteurs aboutirait à une combinaison entre données factuelles et vision stratégique. Cela permettrait également de réduire l'inertie parfois liée à la mise en place de recherche innovante.

Dans la perspective d'Oïkosmos, le terme « intégré », que l'on retrouve dans le projet FIPES de l'ESA, illustre la volonté de combiner les activités multidisciplinaires du futur démonstrateur et leurs techniques associées, issues de domaines variés (médecine, biologie, chimie, physique, TIC), pour trouver des solutions innovantes grâce à l'assimilation de chacune d'entre elles comme partie intégrante d'un ensemble. Il sous-entend l'« incorporation » dans le cadre de ses activités de recherches de domaines, thématiques et sujets de recherches qui entrent dans un tout : l'étude des systèmes clos. Un des buts de l'édification d'un simulateur d'ECA consiste donc à travailler, dès la conception préliminaire de son agenda de recherche, sur un projet intégrateur de disciplines d'avant-garde certes différentes, mais qui interagissent fortement. Cette convergence de trajectoires technologiques réunit un panel de technologies complémentaires, dont la combinaison poursuit un but commun : la fermeture de boucles de flux de matières. Leur intégration en amont doit permettre d'envisager un changement de paradigme et des découvertes capitales pour l'étude des écosystèmes à une échelle de complexité méso (voir §7.3.1.2).

Un autre enjeu du programme Oïkosmos concerne le décloisonnement des sciences et l'intégration de savoirs et de technologies transdisciplinaires, qui sont à la base des produits innovants de demain. Cette démarche vise à faire émerger de nouvelles connaissances par un processus d'interdisciplinarisation combinant les activités de R&D respectives des acteurs impliqués. De manière intéressante, le rôle d'experts en interdisciplinarisation deviendrait alors central pour l'édition, la coordination et la valorisation des recherches, et quasi indispensable aussi bien pour les personnes chargées de faire fructifier les synergies terrestres et spatiales, que pour l'équipe d'expert d'un éventuel Centre de compétences (§14). La mise en œuvre réussie de ces flux d'information permettrait d'intégrer de manière optimale les connaissances et expertises de l'ensemble des personnes collaborant aux activités de simulation au sol.

Dans un tel contexte, le futur simulateur d'ECA pourrait se positionner comme une plateforme intégrative favorisant à la pratique de l'interdisciplinarité, amenant son lot de situations « win-win » entre chercheurs venus d'autres disciplines.

17 Une infrastructure servant à pérenniser la recherche sur les systèmes clos

Une fois établie, une plateforme technologique simulant les ECA sera à même de se profiler comme une infrastructure servant à pérenniser la recherche sur les systèmes clos de par ses rôles : de centralisateur des données et des résultats expérimentaux sur l'étude des ECA ; d'instrument de standardisation de protocoles d'étude en systèmes clos ; et d'amplificateur de la productivité de la recherche spatiale.

✧ *Un centralisateur des données et des résultats expérimentaux sur l'étude des ECA*

Une bibliothèque virtuelle pourrait être hébergée dans le contexte du simulateur, dans le but de cataloguer, de rassembler, de concentrer et d'archiver systématiquement les résultats publiés (et non publiés) des recherches dans une base de données idoine et unifiée, afin de les rendre accessibles et facilement consultables à l'ensemble de la communauté à l'échelle européenne et internationale. Ce rôle de centralisateur des données et des résultats expérimentaux sur l'étude des ECA jouerait notamment un rôle important dans la caractérisation et l'harmonisation des données omiques de l'ECA (§9.2.2) et dans l'exploitation adéquate des données du « Big data » générée par le monitoring minutieux et permanent de l'ECA (§9.3.2).

✧ *Un instrument de standardisation de protocoles d'étude en systèmes clos*

La standardisation de protocoles expérimentaux, de tests et de méthodes basés sur des conditions environnementales uniformisées d'un ECA porterait par exemple sur l'échantillonnage, la collecte et l'analyse de paramètres vitaux (physiologiques, psychologiques) et de données environnementales (contrôle et monitoring de l'exposome) (§7.3.3, §8.2, §9.3.2) ; le calibrage d'appareillage de sensing (§9.3.1), ; ou le développement d'approche commune d'archivage et de partage de données (§9.3.4). Une harmonisation des données expérimentales produites par le simulateur d'ECA permettrait de mieux intégrer les résultats publiés par d'autres membres de la communauté, d'éviter les doublons et de fluidifier les échanges d'information. Ces démarches de normalisation seraient en particulier utiles pour le design de contre-mesures lors de perturbations du système (§7.3.4.5). À titre d'illustration, elles pourraient notamment réduire les déviations inter et intra-individuelles dans les études avec un petit nombre de participants et permettre de minimiser les effets indésirables des contre-mesures.

✧ *Un amplificateur de la productivité de la recherche spatiale sur les systèmes clos*

De telles démarches de centralisation et de standardisation faciliteraient alors un benchmarking et amélioreraient l'interprétation des résultats, favorisant la mise en place de nouvelles synergies de recherche. Avec cette masse d'informations mieux organisée, les activités de R&D se verraient mieux coordonnées et supervisées, et la capitalisation des résultats obtenus au cours du temps améliorées : la visibilité, le nombre et l'utilisation des publications produites au sein d'une installation telle que le simulateur pourraient par exemple être accrus. Le savoir-faire accumulé par les travaux de R&D pourrait

être ainsi mieux valorisé et les résultats de recherches interprétés par des experts d'autres disciplines que celles prévues initialement, mais doté de compétences complémentaires. Avec pour but ultime que le simulateur d'ECA se mue en quelque sorte en « machine à publier » pour la communauté scientifique l'exploitant.

18 Un projet impliquant les citoyens grâce aux sciences participatives et à l'innovation ouverte

Enfin, le programme Oïkosmos et son projet de simulateur d'ECA pourraient tirer parti de l'essor sans précédent des sciences participatives et de l'innovation ouverte, grâce aux facilités offertes par Internet pour intensifier le partage d'informations, scientifiques en l'occurrence.

◇ *L'essor des sciences participatives et de l'innovation ouverte*

De nouvelles plateformes web d'échanges d'information s'inspirent du modèle économique des sites touristiques en ligne qui permettent aux voyageurs de conseiller et commenter les lieux et les établissements visités fréquentés. À titre d'exemple, des initiatives comme *PatientsLikeMe*³⁸⁸ servent de plateformes pour organiser les flux d'informations médicales provenant de patients qui souffrent de la même maladie, en partant de l'idée que les médecins ne peuvent souvent pas se targuer d'avoir vécu la maladie dont leurs patients sont atteints. Au-delà de l'entraide entre malades, certains traitements en développement pourraient se retrouver à l'avenir plus rapidement sur le marché en s'appuyant sur de telles plateformes. Autres approches en vue de nos jours, l'« ecological momentary assessment » (EMA) vise à étudier le comportement ou l'état des participants non pas au laboratoire, mais dans leur environnement normal, *in situ* (Shiffman et al. 2008; Shiffman 2014).

Le programme Oïkosmos pourrait, en temps voulu, mettre à disposition tout ou partie des connaissances accumulées (y compris les manipulations ayant échoué), avant même leur publication par des journaux revus par des pairs. Il s'agirait de créer une plateforme d'échange de connaissances « open source » sur les systèmes clos, permettant d'amplifier le partage d'information. Les auteurs d'une publication sur Oïkosmos pourraient bénéficier des inputs et commentaires de contributeurs ponctuels offrant un flux constant d'information et de conseils. Mais cette transparence et rapidité par rapport à l'inertie des processus classiques de publication scientifique ne doivent pas cacher des risques de confusion et de non-reproductibilité des expériences.

Dans un autre registre, des sociétés comme *NineSigma*³⁸⁹ proposent des services d'innovation ouverte à des organisations publiques ou privées afin d'externaliser leur processus d'innovation et leur facilitant l'accès à des acteurs et des ressources spécialisés en la matière³⁹⁰. Ces dernières années ont également

³⁸⁸ Site web de PatientsLikeMe : www.patientslikeme.com

³⁸⁹ L'innovation ouverte en question s'intéresse en premier lieu aux flux d'information et consiste essentiellement à faciliter de la mise en place de collaborations entre acteurs peu habitués à travailler ensemble. Site web de NineSigma : <http://www.ninesigma.com>

³⁹⁰ Un rôle de facilitateur qui n'est pas sans rappeler celui que jouent les sociétés de conseil en écologie industrielle, telles que Sofies (<https://sofiesgroup.com/services/>). Il s'agit en l'occurrence de favoriser la mise en place de synergies industrielles à l'échelle d'un territoire, par l'intermédiaire de méthodologies et d'outils permettant d'identifier des flux de matières et d'énergie susceptibles d'être échangés ou mutualisés. Ce type de démarche cherche à réduire l'impact environnemental des

vu le nombre de laboratoires citoyens explosés, sur la lancée d'initiatives pionnières comme *Biocurious*³⁹¹ aux États-Unis et *La Paillasse*³⁹² à Paris. Au départ ces laboratoires ont souvent cherché à rendre les équipements de biologie disponibles à tout amateur, inventeur ou entrepreneur, avide d'expérimenter ces idées, faire de la recherche et développer des projets technologiques à un prix abordable. La plupart de ces « citizen-lab » ont à présent élargi leurs domaines d'activités par exemple en accueillant des projets open-source provenant du mouvement des Makers et proposent des Fab-Lab ou (*laboratoire de fabrication* contraction de « fabrication laboratory »), ainsi que des espaces de travail en « co-working ». En Suisse romande, tant l'*Hackarium*³⁹³ dans la région lausannoise que le *Bioscope*³⁹⁴ à Genève ont récemment démarré leurs activités avec un certain succès, fort d'un soutien d'institutions généralement académiques. À noter que L'Éprouvette³⁹⁵, le laboratoire public de l'UNIL joue lui aussi un rôle d'interface entre science et société depuis des années, en proposant des informations, des débats, des ateliers de sciences expérimentales (thèmes : police scientifique, ADN, corps humain, etc.) pour les écoles et les gymnases, sans toutefois accueillir de projets d'innovation ouverte.

La facilitation et la coordination de projets d'innovation ouverte interorganisations pourrait s'avérer bénéfique dans le cadre d'Oikosmos pour externaliser certains projets de R&D auprès de nouveaux acteurs privés ou publics (y compris des institutions de recherche académique). On peut également considérer que certains des services de R&D fournis par le Centre de compétences Oikosmos (§14) sont une forme d'innovation ouverte, de par l'opportunité qu'il offre de distribuer le développement d'un projet technologique émanant d'une entreprise entre plusieurs des parties prenantes de l'écosystème évoluant autour du simulateur d'ECA. Ajoutons qu'à la suite d'un partenariat couronné de succès, les organismes en question auraient la possibilité de rejoindre le Consortium MELiSSA.

Dernier exemple, la mise à disposition de l'ordinateur des citoyens pour l'analyse des recherches permet de réduire drastiquement les coûts élevés de la puissance de calcul à haute performance³⁹⁶. Nécessitant

activités des organisations concernées et à rationaliser leurs coûts opérationnels.

³⁹¹ Site web de Biocurious : <http://biocurious.org>

³⁹² Fer de lance de la communauté des bio-hackers en Europe, La Paillasse se définit comme un lieu d'échange interdisciplinaire offrant sans discrimination d'âge, de diplôme ou de revenu, le cadre juridique et éthique nécessaire à la mise en œuvre collaborative de projets open source fondés sur la non-brevetabilité des techniques. Site web de La Paillasse : <http://lapaillasse.org>

³⁹³ Fondé à Renens et intégré à l'espace communautaire et citoyen UniverCity (<http://university.ch>), Hackarium valorise par exemple les équipements dont les universités ne se servent plus afin d'offrir la possibilité à sa communauté de jouer avec la matière vivante (« hack & make ») en utilisant les outils de la « Do-It Yourself (DIY) biology » et en mettant à disposition son Fab-Lab à ses biohackers en herbe. Site web de l'Hackarium : <http://www.hackarium.ch/en/>

³⁹⁴ Quant à lui, le Bioscope est le laboratoire public des sciences de la vie et des sciences biomédicales de l'Université de Genève. Les projets hébergés par ces deux laboratoires citoyens d'innovation ouverte incluent pour le premier d'abat-jour de lampes en mycélium ou l'impression 3D de structures de protéines, et pour le second la fabrication de microscopes pour smartphone ou de bactérie bioluminescente. Site web du Bioscope : www.bioscope.ch

³⁹⁵ Site web de L'Éprouvette : <http://wp.unil.ch/mediationscientifique/>

³⁹⁶ À titre d'illustration, un supercalculateur comme *RIKEN* de l'Advanced Institute for Computational Science (www.aics.riken.jp/en) à Kobe au Japon peut effectuer dix pétaflops (10 puissance 16 opérations par seconde) pour un coût de l'ordre du milliard de dollars. Or, il est intéressant de relever que quelques milliers d'ordinateurs réunis via des plateformes de

la simple installation d'un logiciel, les volontaires mettent à disposition un peu de la puissance de calcul disponible de leur machine, pour déclencher une activité qui tournera « en tâche de fond ». Des synchronisations, effectuées typiquement à des intervalles quotidiens permettent d'envoyer les résultats au serveur et de proposer de nouvelles données à traiter. Ces démarches remportent un succès notable, parmi lesquels on compte des projets relatifs au spatial ou traitant de biologie moléculaire comme : *Einstein@home*³⁹⁷ : détection de pulsars, 300'000 utilisateurs depuis 2005, > 1'100'000 CPU-an³⁹⁸ ; *SETI@home*³⁹⁹ : recherche d'intelligence extraterrestre, 1'200'000 utilisateurs depuis 1999 et porté par l'université de Berkeley, 3'500'000 CPU-an) ; et *Rosetta@home*⁴⁰⁰ : prédiction de la structure de repliement de protéine thérapeutique, 300'000 utilisateurs depuis 2005, près de 500'000 CPU-an.

Relevons qu'en termes d'écologie industrielle, il semblerait pertinent de s'intéresser à l'impact environnemental (à puissance égale) de tels calculs distribués par rapport à celui de supercalculateurs, en effectuant l'écobilan de ces démarches. Dans le cadre d'Oïkosmos, cette forme de sciences participatives aurait l'avantage d'impliquer les citoyens aux préparatifs de missions d'exploration, notamment dans l'analyse des montagnes de données monitorées dans le cadre d'une simulation terrestre dans un démonstrateur sur de longues périodes pour un coût limité et sans investissement pour de nouvelles infrastructures pour traiter les données.

❖ *Les démarches participatives de « crowdsourcing » et de « crowdfunding »*

À l'heure où les réseaux sociaux semblent à leur apogée, force est de constater que les contacts sociaux virtuels entre individus se démultiplient. Des initiatives collaboratives d'ampleur voient le jour spontanément de plus en plus facilement avec la généralisation de l'accès Internet haut débit au plus grand nombre. De manière intéressante, ces démarches favorisent la participation autant d'experts que de non-experts des thématiques concernées.

Dans un contexte de pression (voire de réduction) des investissements R&D liés à l'innovation pour le *early-seed*, des domaines émergents de management de la connaissance comme le « crowdsourcing » – ou production participative – sont en plein essor, initialement grâce au web 2.0 (voir §6.4.1), et à présent grâce au web 3.0 (§9.3.1). Cette démarche d'« externalisation ouverte » vise en quelque sorte d'externaliser la créativité et à utiliser l'intelligence « en masse » en sous-traitant la résolution d'une problématique à une foule d'internautes. Pionnier en la matière, InnoCentive⁴⁰¹ est une référence depuis

calculs comme *Boinc* offrent la même puissance de calculs pour un coût très faible. Lire l'article de Mary Parlange, « Offrir à la science un peu de son PC », paru dans le Magazine Réflex en avril 2012

³⁹⁷ Site web du projet Einstein@Home : <http://einstein.phys.uwm.edu/index.php>

³⁹⁸ Le CPU-an est une unité correspondant à une année de calcul accompli par un ordinateur standard)

³⁹⁹ Site web du projet SETI@home : <http://setiathome.berkeley.edu/>

⁴⁰⁰ Site web du projet Rosetta@home : <http://boinc.bakerlab.org/>

⁴⁰¹ Site web de Innocentive : www.innocentive.com/

une dizaine d'années dans ces plateformes d'« open innovation », et compte pour références des projets réalisés aussi pour des entreprises de l'envergure de *Procter & Gamble* ou *Roche* que des institutions liées à la science à la technologie comme *Nature.com* ou la NASA. En Suisse, *Atizo*⁴⁰² est l'acteur principal fournissant de telles prestations d'innovation sociale ouverte et en proposant des « plateformes de brainstorming virtuel » pour des entreprises comme la *Migros* ou les *CFF*. Autre acteur de l'innovation ouverte, *XPRIZE Foundation*⁴⁰³ propose toute une série de prix allant de plusieurs milliers (voire de dizaines de milliers) de francs pour la création de composés chimiques ou pour l'identification de biomarqueurs. Même si de telles initiatives restent marginales à quelques exceptions près, quantité de concours scientifiques se développent et se profilent comme alternative intéressante au financement traditionnel de la recherche. À titre d'illustration, *XPRIZE* s'est associé avec de grands groupes pour proposer des prix d'une tout autre envergure, à l'image du *Google Lunar XPRIZE*⁴⁰⁴, qui a proposé dès 2007 trente millions de dollars à la première équipe financée de manière privée capable de lancer un robot sur la Lune.

Au début des années 2000, la NASA travaillait à la synthèse de viande artificielle (à partir de tissu musculaire de poisson) pour les missions d'exploration de longue durée. En 2008, l'association de défense des animaux (PETA) a par exemple promis la coquette somme d'un million de dollars à la première société capable de proposer d'ici à fin 2012 de la viande de poulet fabriquée in vitro. Depuis, un des groupes de recherche du *In Vitro Meat Consortium*⁴⁰⁵ a d'ailleurs réussi à produire un steak de viande in vitro, il est vrai pour un coût au kilo exorbitant pour l'instant. Même si certaines études pourraient être qualifiées de farfelues, en particulier si elles n'ont pas encore l'objet de publications scientifiques dans des journaux « revus par des pairs », de tels prix d'encouragement à l'attention d'une somme de citoyens convaincus peuvent en quelque sorte « amorcer la pompe », en particulier lorsqu'ils sont proposés par des ONG, et faire démarrer des recherches qui n'auraient peut-être jamais vu le jour autrement.

Des opportunités de crowdsourcing et d'externalisation ouverte pour Oïkosmos semblent exister. Il pourrait par exemple être judicieux d'employer de telles approches pour résoudre certains des challenges spécifiques des ECA que ce soit avant, lors ou même après la tenue de la campagne de simulation d'une mission humaine d'exploration spatiale. Une plateforme d'innovation sociale ouverte pourrait être créée, afin de résoudre un problème technique ou de développer une fonction particulière des ECA qui n'arrive pas à être débloquée, mais qui reste réaliste et semble réalisable (p. ex. une meilleure dégradation biologique des déchets lignocellulosiques), permettant ainsi d'orienter la recherche dans les écosystèmes

⁴⁰² Site web de Atizo : www.atizo.com/

⁴⁰³ Site web de la XPRIZE Foundation : www.xprize.org

⁴⁰⁴ Site web du projet Google Lunar XPRIZE : www.googlelunarxprize.org

⁴⁰⁵ Site web du InVitro Meat Consortium : <http://invitromeat.org>

clos dans une direction particulière.

L'intérêt de ce type de sciences participatives est ici d'obtenir de la valeur ajoutée à moindre coût, en complément du travail effectué par les employés des agences spatiales, les opérateurs de la plateforme technologique et les chercheurs et ingénieurs des institutions partenaires. De tels projets feraient collaborer des personnes qui auraient été présélectionnées selon des critères permettant soit de s'assurer d'un minimum de connaissance scientifique souhaité, soit de cibler les thématiques et sujets correspondant le mieux au profil du participant à la démarche. Des imprimantes 3D pourraient être mises à disposition pour le prototypage des meilleures idées, solutions ou produits lors d'un workshop sur l'innovation technologique, par exemple dans le cadre des activités du Forum Oïkosmos.

Les modalités possibles de participation sont diverses, allant du volontariat à la valorisation économique par les primes, mais il paraît motivant pour les participants d'être récompensé d'une manière ou d'une autre pour toute idée, solution, voire produit proposé qui s'avérerait en fin de compte utile au programme Oïkosmos.

Une Fondation Oïkosmos pourrait proposer des prix d'encouragement à l'innovation technologique, et organiser des concours scientifiques d'idée permettant d'atteindre d'un objectif d'envergure. Mais les gagnants pourraient avoir également la possibilité d'être impliqué dans l'élaboration des procédures ou des protocoles expérimentaux qui seront menés dans le simulateur d'ECA, voire dans l'espace ou sur Mars, d'être consulté pour la résolution d'un problème technique en fonction de son profil et de ses compétences scientifiques, de visiter le simulateur lors d'une campagne, de communiquer par vidéoconférence avec l'équipage en cours de mission, ou d'inscrire leur nom figurant sur un des équipements du simulateur, de la navette ou de la base martienne qui pourrait être un jour établie sur la planète Mars. Une fois la préparation de la mission terminée, de telles approches permettraient de définir les nouvelles activités qui se dérouleraient dans les locaux, notamment afin de les rentabiliser.

Autre néologisme qui a le vent en poupe, le « crowdfunding » cherche à récolter des fonds pour financer de projets créatifs par le biais d'« e-plateformes » collaboratives. Fer de lance du mouvement de financement participatif, le site *Kickstarter*⁴⁰⁶ a par exemple financé nombre de projets touchant aussi bien le design, de produits de consommation (vêtements intelligents, montres, etc.), que d'activités culturelles (jeux vidéos, documentaires, spectacle de théâtre, projets musicaux, etc.), avec des financements pouvant atteindre pour certains plusieurs millions de francs⁴⁰⁷. De nombreux projets technologiques ont été financés⁴⁰⁸, dont des logiciels d'assistance à la croissance des plantes, des

⁴⁰⁶ Site web de Kickstarter : www.kickstarter.com

⁴⁰⁷ La levée de fonds de la montre connectée Pebble Time a atteint 10 millions de dollars en 2012 pour 85'000 précommandes : [https://en.wikipedia.org/wiki/Pebble_\(watch\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Pebble_(watch))

⁴⁰⁸ Page dédiée aux technologies sur le site web de Kickstarter : www.kickstarter.com/discover/categories/technology?ref=sidebar

imprimantes 3D, des systèmes photovoltaïques miniaturisés et de nombreux capteurs pour smartphones.

Dans la perspective d'Oïkosmos, il pourrait s'avérer intéressant d'envisager un financement participatif d'équipements spécifiques, d'expériences menées lors d'une campagne de simulation ou post-simulation (choisie parmi une palette de possibilités proposées aux internautes), voire même d'une partie du simulateur lui-même, afin d'accélérer son développement. Avec des coûts initiaux relativement limités, de telles approches collaboratives auraient le mérite de permettre une communication à grande échelle des enjeux d'Oïkosmos, et de créer une certaine effervescence autour des missions Mars comme l'avait fait Mars One lors de son lancement.

19 Considérations finales

Malgré la montée en puissance d'acteurs privés et l'avènement de la New Space en ce début de XXI^e siècle, les lignes budgétaires de plus en plus serrées des agences spatiales – autant du côté de l'ESA que de la NASA – ralentissent la préparation des missions d'exploration habitée de longue durée. Même si l'ESA ne semble manifestement pas remettre en question le développement de telles missions, en témoigne ses projets au long cours comme MELiSSA, l'intérêt spatial ne semble plus capable à lui seul de justifier les coûts élevés de leur réalisation au niveau des organes nationaux. Avec sa pertinence terrestre forte, le déploiement d'Oïkosmos et la construction d'un simulateur d'ECA européen pourraient rendre les citoyens des pays membres de l'ESA plus réceptifs à la poursuite de projets dont l'aboutissement consiste à envoyer l'Homme sur Mars.

Dès lors, l'ESA aurait tort de ne pas tirer profit de bâtir une structure ouverte aux coopérations interinstitutionnelles, sous la forme d'une plateforme technologique. Pilotée avec une gestion de type public-privé à but non lucratif, l'installation au sol permettrait d'accueillir des clients des milieux académiques (chercheurs) et industriels. À terme, le modèle discuté dans la Partie III pourrait être à même de financer partiellement certaines des activités de recherche d'Oïkosmos. Il s'agirait notamment de mutualiser les surfaces et les équipements laboratoires à disposition ou de proposer des services de R&D (étude de faisabilité, design de concept, prototypage, licences de propriétés intellectuelles, etc.), par l'intermédiaire d'une équipe multidisciplinaire d'experts hautement qualifiés sur les technologies associées aux ECA. Un tel centre de compétences sur les systèmes clos pourrait alors se profiler comme un « one-stop-shop » pour les compagnies et les industries innovantes. En outre, le Forum Oïkosmos (aussi bien l'interface Science-Société que la plateforme Science-Industrie) serait peu coûteux à mettre en place, et potentiellement opérationnel avant la fin des travaux de construction. D'ailleurs, les coûts de développement d'un simulateur d'ECA tel que FIPES devraient être significativement inférieurs aux deux milliards d'euros du dernier accélérateur du CERN (LHC), ou encore aux treize milliards d'euros du projet ITER⁴⁰⁹. Autrement dit, le démonstrateur devrait offrir un probable meilleur rapport coût/bénéfice pour la société. En effet, grâce à ses conditions stimulantes, il accélérerait le transfert de savoir et de technologie liés au système clos, à la fois en créant des spin-offs qui seraient incubées à proximité ou en soutenant d'autres qu'elle aurait attirée en de ce qui pourrait devenir un Pôle sur les ECA.

Pierre angulaire du programme Oïkosmos, le simulateur d'ECA pourrait avoir une vie propre à son site et proposer des espaces de promotion de l'innovation, de la science et de la technologie : salles de conférences et de séminaires, halls d'expositions, restaurants, etc. Le développement progressif d'activités supplémentaires et d'un réseau de compétences par le biais d'un forum, d'un centre de

⁴⁰⁹ Source : site web d'ITER : www.iter.org/fr/faq#Do_we_really_know_how_much_ITER_will_cost

compétence et d'un incubateur Oïkosmos rendrait l'environnement du simulateur – déjà techniquement favorable – propice à des échanges d'expériences technologiques et commerciales, faisant de lui plus qu'une série d'infrastructures ultramodernes adaptées aux besoins de ses locataires, utilisateurs et clients. Une dynamique pourrait alors se former autour du simulateur d'ECA pour se disputer son accès, ses locaux, ses équipements et l'expertise autour de sa plateforme technologique, de la même manière que sont des physiciens en compétition pour utiliser le peu d'accélérateurs de particules à disposition ou des astronomes pour accéder aux télescopes de grande envergure.

Un panachage réfléchi et équilibré entre chercheurs, spécialistes et experts collaborant à tous les niveaux de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » positionnera le simulateur d'ECA à la fois comme moteur de l'éco-innovation et comme amplificateur d'interactions et de partenariats. De surcroît, il représentera un banc d'essai d'un nouveau genre et un formidable instrument pour favoriser le développement technologique d'applicatifs et de solutions innovantes. Avec pour perspective de devenir à terme la vitrine technologique d'applications « made in Europe » à la convergence du spatial et du terrestre. Espérons ainsi que la mise en œuvre de ce projet puisse révéler plus facilement les synergies possibles entre les acteurs des deux communautés scientifiques. En donnant une impulsion bienvenue à la politique spatiale européenne, il renouvèlera l'intérêt d'une partie des citoyens européens envers le spatial et permettra d'accélérer la recherche sur les ECA.

Ainsi, Oïkosmos est un programme voué à s'inscrire dans la durée. L'enjeu clair associé à sa pérennisation repose sur le développement d'une plateforme de R&D d'envergure dédiée à l'étude des systèmes clos et parfaitement adaptée à son agenda de recherche.

En résumé, cette troisième partie a examiné de manière approfondie la combinaison de caractéristiques et d'atouts qui permettent au simulateur d'ECA de se profiler non seulement comme un « démonstrateur technologique » pour développer et valider les technologies spatiales, mais également comme une plateforme technologique de premier plan pour l'étude des systèmes clos et de la durabilité terrestre.

PARTIE IV : VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE ?

La Partie IV de ce rapport dresse un panorama succinct de l'écosystème de l'innovation de Suisse occidentale (§20) et démontre des opportunités offertes par l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale et pour le secteur spatial suisse (§21). Le §22 propose des considérations finales.

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales du rapport

20 Le contexte de l'innovation en Suisse occidentale

Afin de dresser le panorama succinct de l'écosystème de l'innovation en Suisse occidentale en 2016, les activités suivantes ont été réalisées, et sont détaillées dans les prochaines sections :

- Le catalogage des caractéristiques générales et des atouts clés de la Suisse occidentale (§20.1) ;
- La catégorisation des structures, des organisations et des acteurs de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » de Suisse occidentale (§20.2).

20.1 Les caractéristiques générales et les atouts clés de la Suisse occidentale

La Suisse occidentale bénéficie depuis 2010 d'une structure de promotion économique commune à ses six cantons (Berne, Fribourg, Genève, Neuchâtel, Vaud et Valais), le Greater Geneva Berne Area (GGBa)⁴¹⁰. Cette région représente la moitié du territoire suisse et réunit 2.8 millions d'habitants (dont près d'un quart de ressortissants étrangers). En 2016, la Suisse occidentale présente les caractéristiques suivantes⁴¹¹ :

- un environnement international et multilingue comme le démontrent les 17 % de la population s'exprime quotidiennement en anglais au travail ;
- des relations privilégiées avec l'Union européenne, grâce à la mise à jour, l'extension et le renouvellement continu des accords bilatéraux existants ;
- une situation centrale idéale pour accéder au marché européen ;
- un lieu de rencontre unique des cultures française et allemande ;
- une qualité de vie et un cadre de travail exceptionnels (environnement sûr, grande offre d'activités culturelles et de loisirs et système de santé de haute qualité) ;
- une législation du travail stable, incluant une des meilleures protections de la propriété intellectuelle et une excellente sécurité de l'information ;
- des autorités au service des entreprises avec des mesures d'incitation et une imposition modérée des sociétés ;
- une stabilité politique ;
- une sécurité de l'environnement ;
- des institutions académiques réputées ;
- un des leaders européens de l'innovation ;
- des services efficaces et des infrastructures de pointe.

⁴¹⁰ Adapté des éléments listés sur le site web du GGBa : www.ggba-switzerland.ch

⁴¹¹ Adaptation des atouts listés sur le site web du GGBa : www.ggba-switzerland.ch/atouts/, dernière consultation le 02.08.2015

L'étude a ensuite sélectionné les atouts clés de la Suisse occidentale favorisant la mise en place de synergies de recherche avec le programme Oikosmos et rendant la région attractive dans l'optique d'héberger un jour un simulateur d'ECA, à savoir :

✧ *Une situation géographique centrale et au cœur de l'Europe.* Avec une connexion aisée avec les principaux centres et villes mondiales et européennes, l'emplacement en Suisse occidentale aurait l'avantage d'être à proximité non seulement de l'UNIL, membre à part entière du Consortium MELiSSA depuis 2015 (§24), mais aussi de la plupart des autres institutions qui en font partie, ce qui pourrait être favorable au succès du projet.

✧ *Un dynamisme grâce à une main-d'œuvre hautement qualifiée et productive.* La Suisse occidentale dispose d'une économie performante (main-d'œuvre qualifiée, multiculturelle et multilingue, grande diversité d'acteurs hautement spécialisés, politique libérale, pouvoir d'achat stable, taux de chômage faible d'environ 3%) et d'un système de formation de haut niveau (orientation académique et métiers). Le label de « qualité suisse » repose sur le travail (productivité), les produits (précision et qualité), un savoir-faire multidisciplinaire, une main-d'œuvre motivée et des infrastructures efficaces.

✧ *Des politiques de soutien à la recherche et à l'innovation encouragées par ses autorités.* La Suisse jouit d'une excellente réputation en ce qui concerne ses capacités d'innovation. Pour preuve, la position de notre pays en tête de classement depuis des années dans l'European Innovation Scoreboard⁴¹². En Suisse occidentale, les autorités proposent d'une part un système réputé d'encouragement à la recherche et d'autre part, des mesures d'incitation à l'investissement, mises en place au niveau cantonal et fédéral, pour encourager l'implantation de nouvelles sociétés ou la création de start-ups (crédits d'impôt, exonérations fiscales temporaires, aides à l'investissement, aides à la R&D et à la commercialisation, etc.), ainsi que des démarches administratives réduites au minimum ainsi que par une approche politique et législative en faveur des entreprises.

✧ *Une puissance scientifique grâce à un écosystème extrêmement dense d'acteurs de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché ».* La Suisse occidentale dispose d'une palette d'acteurs, d'institutions et d'installations de premier plan pour les différentes étapes de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché⁴¹³, en particulier : des institutions de recherche académique réputées, tant au niveau de la R&D fondamentale que de la R&D appliquée (§5.2.1) ; la présence d'hôpitaux universitaires, comme le Centre hospitalier universitaire vaudois (§5.2.1.2), les Hôpitaux de Genève et

⁴¹² Voir les rapports annuels de l'European Innovation scoreboard », téléchargeables sur : https://ec.europa.eu/growth/industry/policy/innovation/scoreboards_en, dernière consultation le 02.08.2015

⁴¹³ Voir à ce sujet le document « La R&D dans le Greater Geneva Berne area » de l'Agence de développement économique de Suisse occidentale paru en 2012 et téléchargeable sur : www.ggba-switzerland.ch/fileadmin/groups/1/fact-sheets/French/GGBa-FactSheet-La-R&D-French.pdf (dernière consultation le 01.01.2015)

l'Inselspital de Berne (§5.2.1.5) ; des infrastructures et des installations académiques de recherche à la pointe (voir plateformes technologiques dédiées aux sciences de la vie au §5.2.1.7) ; la présence de clusters scientifiques et technologiques (§20.2.3) et de plateforme de soutien à l'innovation (§20.2.4), qui seront passés en revue ci-après. L'ensemble de ces acteurs forme un véritable écosystème de l'innovation (voir Figure 22), prompt à accélérer le transfert de technologie d'applications et de solutions innovantes. Cet écosystème renforce le potentiel synergistique de la Suisse occidentale, en particulier dans la perspective d'héberger un simulateur d'ECA dans la région (voir §21.1).

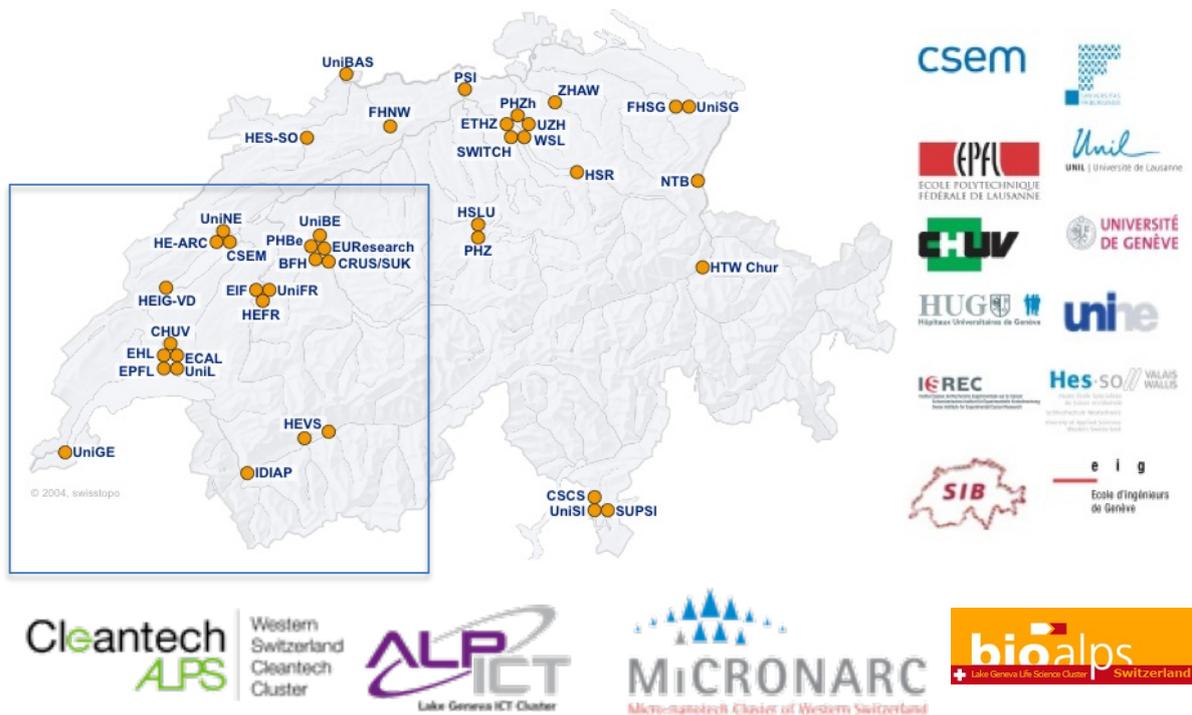


Figure 22: L'écosystème de l'innovation offert par la Suisse.

La Suisse offre un écosystème de l'innovation particulièrement varié et dense, comme le démontre cette vue générale des institutions académiques du pays, avec à droite les logos des principales institutions de Suisse occidentale. Les logos du bas sont ceux des clusters scientifiques et technologiques de la région que sont CleantechAlps, AlpiCT, Micronarc et BioAlps, qui pourraient avoir un rôle intéressant à jouer comme on le verra au prochain chapitre.

20.2 Les structures, les organisations et les acteurs de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché » de Suisse occidentale

Les structures, les organisations et les acteurs de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché de Suisse occidentale – c’est-à-dire son écosystème de l’innovation au sens large – et pertinents pour dans le contexte d’Oïkosmos, ont été catégorisés de la manière suivante :

- pôles de recherche académiques (§20.2.1) ;
- plateformes technologiques dédiées aux sciences de la vie (§20.2.2) ;
- clusters (technologiques) de l’innovation (§20.2.3) ;
- pôles de compétences en technologie (soutien à l’innovation) : clusters de promotion des technologies et plateformes de transfert de technologies (§20.2.4) ;
- incubateurs et les parcs scientifiques et technologiques (§20.2.5) ;
- centres de recherches privés dans les hautes technologies (§20.2.6) ;
- principales institutions du secteur spatial suisse (§21.2).

Une revue des champs de compétences et des domaines d’expertise de l’ensemble de ces acteurs a permis de sélectionner ceux dont la recherche présente un potentiel pour l’établissement de synergies dans le cadre du programme Oïkosmos (voir en particulier le §5.2 et la Partie II) *et/ou* dont les activités, produits *et/ou* services offrent des opportunités de transfert de savoir et de technologies autour des activités du simulateur d’ECA, qui seront discutées au §21.1.

20.2.1 Les institutions de recherche académique de Suisse occidentale

La Suisse occidentale est à la pointe en matière de recherche fondamentale et appliquée. Des accords bilatéraux avec les pays européens et des programmes d’échanges entre chercheurs sont nombreux et permettent des synergies de compétence. La Suisse est le pays qui réalise le plus grand nombre de publications scientifiques par million d’habitants et possède un des plus hauts taux d’investissement en capital-risque pour la R&D. Au niveau national, la Suisse consacre près de 3% de son PIB à la R&D⁴¹⁴, contre 2% en moyenne dans l’Union européenne. Selon la revue scientifique internationale *Nature*, la Suisse arrive en tête du classement des 31 nations qui produisent le 98 % des recherches scientifiques mondiales) (King 2004). La Suisse se place ainsi au premier rang international du taux de citation par publication (1,7), mesure significative de l’impact scientifique d’un pays. De même, les publications

⁴¹⁴ Selon le communiqué de presse de l’OFS Communiqués de presse du 08.07.2014 : www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/news/medienmitteilungen.html?pressID=9567

scientifiques issues de la recherche en Suisse se classent au premier rang mondial pour la biochimie, la microbiologie, les sciences de l'environnement, les sciences des matériaux, au deuxième rang pour la biologie moléculaire et la génétique et au troisième rang en matière de chimie et de sciences de l'ingénierie⁴¹⁵.

Les principales institutions de recherche académiques de Suisse occidentale identifiées sont :

- les six universités cantonales : l'Université de Lausanne (UNIL)⁴¹⁶, l'Université de Genève (UNIGE)⁴¹⁷, l'Université de Neuchâtel (UniNE)⁴¹⁸, l'Université de Fribourg (UniFR)⁴¹⁹ et l'Université de Berne (UniBE)⁴²⁰.
- l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)⁴²¹ ;
- les Hôpitaux universitaires : le Centre hospitalier universitaire vaudois à Lausanne (CHUV)⁴²², les Hôpitaux universitaires de Genève (HUG)⁴²³ et l'Hôpital universitaire de Berne (Inselspital)⁴²⁴.
- l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN)⁴²⁵;
- le Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM)⁴²⁶;
- le Pôle scientifique et technologique du canton de Fribourg (PST-FR)⁴²⁷;
- l'Idiap Research Institute (intelligence artificielle perceptive)⁴²⁸;
- l'Adolphe Merkle Institute (AMI, nanosciences)⁴²⁹ ;
- Les instituts et unités de recherche de la Haute Ecole Spécialisée de Suisse occidentale (HES-SO) : la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud (HEIG-VD)⁴³⁰ de la Haute École Vaudoise, l'École d'ingénieurs et d'architectes de Fribourg (EIA-FR)⁴³¹ de la HES-SO Fribourg, la HES-SO Genève (HES-GE)⁴³², la HES-SO Valais⁴³³ et la Haute École Arc (Berne-

⁴¹⁵ Source : cluster BioAlps : www.bioalps.org/biotechnology/national-research-clusters-networks.html

⁴¹⁶ Site web de l'UNIL : www.unil.ch

⁴¹⁷ Site web de l'UNIGE : www.unige.ch

⁴¹⁸ Site web de l'UniNE : www2.unine.ch

⁴¹⁹ Site web de l'UniFR : www.unifr.ch

⁴²⁰ Site web de l'UniBE : unibe.ch

⁴²¹ Site web de l'EPFL : www.epfl.ch

⁴²² Site web du CHUV : www.chuv.ch

⁴²³ Site web des HUG : www.hug-ge.ch

⁴²⁴ Site web de l'Insel : www.insel.ch/fr

⁴²⁵ Site web du CERN : public.web.cern.ch

⁴²⁶ Site web du CSEM : www.csem.ch

⁴²⁷ Site web du PST-FR : pst-fr.ch

⁴²⁸ Site web de l'Idiap Research Institute : www.idiap.ch

⁴²⁹ Site web de l'AMI : www.am-institute.ch/en

⁴³⁰ Site web de la HEIG-VD : www.heig-vd.ch

⁴³¹ Site web de l'EIA-FR : www.eia-fr.ch

⁴³² Site web de la HES-SO Genève : www.hesge.ch/

⁴³³ Site web de la HES-SO Valais : www.hevs.ch

Jura-Neuchâtel)⁴³⁴.

En complément, le rapport a également considéré certains groupes et instituts parmi les institutions de recherche suisse allemandes suivantes :

- la Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (ETHZ)⁴³⁵ ;
- l’Institut de recherche de l’eau du domaine des EPF (EAWAG)⁴³⁶ ;
- l’Institut de recherche et de services interdisciplinaire des sciences des matériaux et des technologiques du domaine des EPF (EMPA)⁴³⁷ ;
- le Centre de recherche en matière de sciences naturelles et sciences de l’ingénieur de Suisse du domaine des EPF, le Paul Scherrer Institut (PSI)⁴³⁸.
- l’International Space Science Institute (ISSI)⁴³⁹ ;
- le Friedrich Miescher Institute for Biomedical Research (FMI)⁴⁴⁰.
- la Haute école de sciences appliquées de Zürich (ZHAW)⁴⁴¹ ;
- l’Institut Universitaire Kurt Bösch (IUKB)⁴⁴².

La revue des groupes de recherche issus des institutions listées ci-dessus a permis de sélectionner ceux dont les domaines d’activités pourraient s’avérer pertinents pour favoriser l’établissement de synergies de recherche (voir §5.2.1).

20.2.2 Les plateformes technologiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie

Les installations et infrastructures académiques de Suisse occidentale dédiées aux sciences de la vie et potentiellement pertinentes pour le soutien à la mise en place de synergies de recherche ont ensuite été identifiées, sur la base d’une étude d’Alliance-TT cataloguant les plateformes technologiques de la région⁴⁴³. Ensemble, elles fournissent une large palette de services dans les domaines de l’imagerie⁴⁴⁴,

⁴³⁴ Site web de la HE-ARC : ingenierie.he-arc.ch

⁴³⁵ Site web de l’ETHZ : www.ethz.ch

⁴³⁶ Site web de l’EAWAG : www.eawag.ch

⁴³⁷ Site web de l’EMPA : www.empa.ch

⁴³⁸ Site web du PSI : www.psi.ch

⁴³⁹ Site web de l’ISSI : www.issibern.ch

⁴⁴⁰ Site web du FMI : www.fmi.ch

⁴⁴¹ Site web de ZHAW : www.zhaw.ch

⁴⁴² Site web de l’IUKB : www.iukb.ch/

⁴⁴³ Academic life sciences core facilities in Western Switnerland, Alliance-TT, 2012

⁴⁴⁴ Plateformes dédiées à l’imagerie : la Bioimaging Platform de l’UNIGE du National Centres of Competence in Research « Frontiers in Genetics » (<http://bioimaging.frontiers-in-genetics.org>) ; le Cellular Imaging Facility du CHUV et de l’UNIL

de la génomique et de la bioinformatique⁴⁴⁵, de la protéomique⁴⁴⁶, des modèles animaux⁴⁴⁷, des études humaines⁴⁴⁸, du criblage biomoléculaire⁴⁴⁹, de la cytométrie de flux⁴⁵⁰, de l'expression des protéines⁴⁵¹, et de l'analyse chimique⁴⁵².

Cette palette de plateformes technologiques démontre que la Suisse occidentale est exceptionnellement bien équipée pour conduire une recherche innovante, puisqu'elle dispose d'installations et infrastructures ultramodernes fournissant des services non seulement à des partenaires académiques, mais aussi à des clients industriels, avec des technologies et des exigences qualité à l'état de l'art de la technique et à un prix abordable. De plus, elles proposent des activités sur mesure comme des formations à des techniques spécifiques ou aux méthodes d'investigations cliniques, et permettent le partage de bonnes pratiques, méthodes et protocoles expérimentaux.

La plupart opèrent en parallèle leurs propres activités de recherches, assurant une mise à jour constante des connaissances, des équipements et de l'expertise. Elles peuvent être considérées en quelque sorte comme des plateformes technologiques semi-fermées, c'est-à-dire exploitées par les institutions qui les hébergent (UNIL, CHUV, EPFL, etc.), mais également les laboratoires de recherches partenaires, les start-ups des parcs technologiques et autres incubateurs, ainsi que par les entreprises. Le fait que les prestations adressées à des acteurs privés ce ne soit pas leur but premier explique probablement la relativement faible proportion de PME et d'industries les utilisant effectivement.

Un simulateur d'ECA aurait par contre intérêt à proposer ses prestations à des organisations issues du privé, en particulier dans l'optique d'assurer un autofinancement de certaines de ces activités (voir §14

(www.unil.ch/cif) ; l'Electron Microscopy Facility de l'UNIL (www.unil.ch/emf) ; le Pôle Facultaire de Microscopie Electronique de l'UNIGE (<https://www.unige.ch/medecine/pfmu/en/>) ; le BioEM Facility de l'EPFL (<http://cime.epfl.ch/page-26765.html>) ; la BioImaging & Optics platform de l'EPFL (<http://biop.epfl.ch/>).

⁴⁴⁵ Plateformes dédiées à la génomique et de la bioinformatique : le Genomic Technologies Facility de l'UNIL (www.unil.ch/dafl) ; le Bioinformatics and Biostatistics Core Facility de l'EPFL (<http://bbcf.epfl.ch>) ; la Genomics Platform de l'UNIGE du National Centres of Competence in Research « Frontiers in Genetics » (<http://genomics.frontiers-in-genetics.org>) ; et le DNA Sequencing Facility de l'UNIGE (www.medgen.unige.ch/research/dna.html).

⁴⁴⁶ Plateformes dédiées à la protéomique : le Protein Analysis Facility (PAF) de l'UNIL (<https://www.unil.ch/paf/home.html>) ; le Protein and Peptide Chemistry Facility (PPCF) de l'UNIL (<https://www.unil.ch/dof/en/home/menuinst/our-research-platforms.html>) ; le Proteomics Core Facility (PCF) de l'EPFL (<http://pcf.epfl.ch>) ; le Proteomics Core Facility (PCF) de l'UNIGE (www.expasy.org/ch2d/service) ; et le quantitative Mass Spectrometry Facility de l'UNIL (www.unil.ch/qmsf).

⁴⁴⁷ Plateformes dédiées aux modèles animaux : le Cardiovascular Assessment Facility de l'UNIL (www.unil.ch/caf) ; le Histology Core Facility de l'EPFL (<http://hcf.epfl.ch>) ; le Mouse Metabolic Facility de l'UNIL et du CHUV (<https://www.unil.ch/cig/en/home/menuinst/research-facilities/mef.html>) ; et le Transgenic Animal Facility de l'UNIL et du CHUV (www.unil.ch/taf).

⁴⁴⁸ Plateformes dédiées aux études humaines : le Clinical epidemiology Center de l'UNIL et du CHUV (www.chuv.ch/ceplic) ; le Clinical Research Center de l'UNIL et du CHUV (www.cardiomat.ch) ; le Clinical Research Center de l'UNIGE (<http://crc.hug-ge.ch>) le Global Access to Health Platform des HUG (<http://globalaccessstohealth.net>) ; et le Swiss Centre for Applied Human Toxicology de l'UNIGE (www.scaht.org).

⁴⁴⁹ Plateforme dédiée au criblage biomoléculaire : le Biomolecular Screening Facility de l'EPFL (<http://bsf.epfl.ch>).

⁴⁵⁰ Plateforme dédiée à la cytométrie de flux : le Flow Cytometry Core Facility de l'EPFL (<http://fccf.epfl.ch>).

⁴⁵¹ Plateforme dédiée à l'expression des protéines : le Protein Expression Core Facility (PECF) de l'EPFL (<http://pecf.epfl.ch>).

⁴⁵² Plateforme dédiée à l'analyse chimique : le Service Analytique Facultaire de l'UNINE (<http://www2.unine.ch/saf>) et la plateforme Sciences Mass Spectrometry de l'UNIGE (<http://www.ms.unige.ch/sms>).

sur le Centre de compétences Oïkosmos).

Les activités et services de ces plateformes technologiques qui pourraient s'avérer pertinents dans le contexte d'Oïkosmos ont été compilés au §5.2.1.7.

20.2.3 Les clusters de Suisse occidentale

La Suisse peut compter sur la présence de clusters académiques et technologiques parmi les plus dynamiques au niveau mondial et capitaliser sur les compétences pointues dans l'industrie de précision, la microtechnique, les biotechnologies, l'industrie horlogère, le secteur bancaire et financier, les assurances et l'agroalimentaire. Quant à elle, la Suisse occidentale se positionne pour attirer les investissements dans les secteurs à haute valeur ajoutée. Ses dix clusters les plus dynamiques⁴⁵³ sont :

- l'énergie et l'environnement (y compris les technologies environnementales) ;
- les micro- et nanotechnologies et l'ingénierie de précision ;
- les technologies médicales les hautes technologies liées à la santé ;
- la pharmacie et les biotechnologies ;
- la nutrition et les produits de grande consommation ;
- les technologies de l'information et de la communication (TIC) ;
- l'horlogerie, produits de luxe, cosmétiques et parfums ;
- les services bancaires, financiers et commerciaux ;
- les sièges de sociétés et centres de services internationaux ;
- les organisations internationales.

Chacun des clusters ci-dessus est brièvement décrit dans les paragraphes ci-après :

❖ *Cluster « Énergie et environnement »*. Les organisations actives dans les technologies environnementales, ou cleantech – communément appelées technologies vertes, écotecnologies, ou greentech –, sont une des forces principales de la région. Les exigences légales élevées en termes de protection de l'environnement ont notamment permis d'accélérer la recherche dans le domaine. L'expertise académique et le savoir-faire industriel disponibles dans la région englobent : le traitement des déchets et le recyclage ; la production d'énergie électrique ; le photovoltaïque ; la mobilité douce ; la construction à haut rendement énergétique ; les énergies hydrauliques ; les réseaux intelligents de distribution d'électricité (smart grids) ; l'écologie industrielle ; les systèmes de contrôle et de

⁴⁵³ Plus d'informations sur les clusters sur le site web du GGBa : www.ggba-switzerland.ch/fr/nos-clusters

purification de l'eau et de l'air. Parmi les centres de recherche de premier plan, la région compte le Centre de l'énergie de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), la filiale Écotechnologie de la Haute École d'Ingénierie et de Gestion du canton de Vaud (HEIG-VD), le Centre Suisse d'Électronique et de Microtechnique (CSEM), la Faculté de Géoscience et de l'environnement de l'Université de Lausanne. Les principaux acteurs du secteur photovoltaïque de la région des Trois-Lacs se sont regroupés pour former le Pôle suisse de technologie solaire⁴⁵⁴, constitué le 21 juin 2010 à Neuchâtel. Les entreprises d'envergure actives dans la région incluent Meyer Burger, Sputnik, SunPower Systems, DuPont, Oerlikon Solar, VHF Technologies (Flexcell) et Frewitt.

❖ *Cluster « Micro et nanotechnologies et ingénierie de précision »*. La région est également réputée dans les secteurs des micro- et nanotechnologies et de l'ingénierie de précision. Elle héberge des entreprises internationales telles que Marvell, Semtech, Festo Microtechnology, Innovative Silicon, Colibrys, Melexis Technologies et Etel, mais aussi des dizaines de milliers de professionnels hautement qualifiés au sein de plus de deux milliers d'entreprises de toutes tailles œuvrant à la pointe des compétences au niveau des applications et de la production. Les compétences et le savoir-faire de ce secteur, en termes de miniaturisation, d'automatisation, de micromécanique et de microélectronique, ont pu être appliqués aux autres technologies des autres clusters (medtech, biotech, chimie, écotechnologie, TIC, etc.).

❖ *Cluster « Technologies médicales les hautes technologies liées à la santé »*. En Suisse, les medtechs tirent parti du savoir-faire horloger et de l'expertise en ingénierie de précision, couplés à des financements importants dans le soutien à l'innovation. Elles comptent pour 2% du PIB, forte de ses plus de 3'700 entreprises et de près de 50'000 emplois. Dans son rapport 2010, la Fédération des associations suisses du commerce et de l'industrie de la technologie médicale (FASMED)⁴⁵⁵, estime que les investissements de la branche représentent plus de 20% des investissements dans la R&D appliquée chaque année en Suisse. Forte de près de 700 entreprises et de nombreuses multinationales, la Suisse occidentale est compétitive dans le domaine des medtech, avec des sociétés comme Alcon, Bio-Rad Laboratories, Pall Life Sciences, Medtronic, Beckman Coulter, Stryker, Synthes, Edwards Lifesciences, Greatbatch Medical, Ypsomed, Straumann et Johnson & Johnson.

❖ *Cluster « Pharmacie et biotechnologies »*. Forte de son cluster pharma en forte croissance, la Suisse occidentale s'est positionnée ces dernières années comme une vallée de la santé, en réunissant des compétences uniques en Europe dans les secteurs des biotechnologies et des technologies médicales (medtech)⁴⁵⁶. Cette « health valley » lémanique représentent, quelque 20'000 emplois industriels, dans

⁴⁵⁴ Site web du Pôle : www.polesolaire.ch

⁴⁵⁵ Site web de FASMED : www.fasmed.ch/fr/bienvenue.html

⁴⁵⁶ Selon Benoît Dubuis, président de BioAlps « avec ses 750 entreprises spécialisées dans la pharma, la biotechnologie et les technologies médicales, avec ses 500 laboratoires travaillant dans les sciences de la vie, la vallée de la santé qui s'étend de Genève à Viège et de Bienne à Lausanne est bel et bien devenue une réalité ».

les grandes entreprises, mais aussi dans une nuée de start-ups. Sans oublier les 5000 chercheurs des laboratoires publics et privés^{457, 458}. La région compte parmi ces acteurs : Lonza, Novartis, Merck-Serono, Alcon, Crucell, Ferring Pharmaceuticals, Baxter, CSL, Behring, Glenmark, Glaxo-SmithKline, UCB Farchim, Debiopharm et Celgene, Phonak.

✧ *Cluster « Nutrition et produits de grande consommation »*. Des acteurs incontournables du secteur de la production de biens de grande consommation (produits de soin, produits ménagers et d'entretien, les produits pharmaceutiques et agroalimentaires) sont basés dans la région comme Nestlé, Nespresso, Philip Morris International (PMI), Cadbury Schweppes et General Mills ou encore Procter & Gamble (P&G).

✧ *Cluster « Technologies de l'information et de la communication (TIC) »*. Riche en centre de compétences collaborant avec les entreprises⁴⁵⁹, la Suisse occidentale dispose d'une expertise unique dans le domaine des technologies de l'information et de la communication (TIC), en particulier dans le développement de logiciels, le consulting et les télécommunications. Il existe une forte collaboration entre la recherche et l'industrie. Dans le contexte des habitats intelligents, la Suisse occidentale peut s'appuyer sur des acteurs de renom comme STMicroelectronics, un des leaders mondiaux pour les MEMS à Genève⁴⁶⁰. Sur le marché de la domotique, de jeunes sociétés suisses comme DomoSafety offrent des « technologies ergonomiques pour la prévention, la sécurité et le confort des personnes âgées »⁴⁶¹. D'autres comme Geroco-Ecowizz proposent une solution favorisant l'efficacité énergétique, basée sur des prises branchées aux appareils énergivores dans un logement comme dans un bureau⁴⁶². D'autres start-ups de pointe sont actives dans l'efficacité énergétique des bâtiments (eSmart⁴⁶³), des transports (routeRANK, Green Motion⁴⁶⁴), mais aussi dans les réseaux de distribution «intelligents», les smart grids (NeoTechnologies⁴⁶⁵, DEPSys⁴⁶⁶). La région compte également parmi ces acteurs : IBM, T-Systems et Swisscom, HP, Microsoft, SAP, Logitech, VeriSign, Autodesk, Cisco, Yahoo! et Salesforce.

⁴⁵⁷ Voir le dossier « Biomédical : le nouveau miracle industriel romand » paru dans L'hebdo n°9, 2010 www.hebdo.ch/edition/2010-9/index.htm

⁴⁵⁸ Relevons que le projet Oikosmos a été présenté lors de la conférence « Health Valley: le prochain atout lémanique ? » du 3 mars 2010 organisée à Genève par le Forum des 100, initiative du magazine économique L'Hebdo organisée par l'UNIL.

⁴⁵⁹ Centres de compétence dans le domaine des TIC de Suisse occidentale : www.ggba-switzerland.ch/fr/nos-clusters/technologies-de-linformatique-et-de-la-communication-tic/

⁴⁶⁰ Page web de STMicroelectronics dédiée aux senseurs et MEMS : www.st.com/web/en/catalog/sense_power/FM89

⁴⁶¹ Site web de DomoSafety, dont le « Votre maison veille sur vous » : www.domo-safety.com/fr/index.html

⁴⁶² En détectant les consommations superflues (TV, ordinateur, imprimante, machine à café, etc.) et en les communicant les données sans fil sur le cloud informatique, l'utilisateur peut ensuite utiliser, grâce à une interface web intuitive, des fonctionnalités de « coupe-veille » et de « programmation », permettant une réduction automatique de la consommation, tout en évitant une perte de confort

Site web de la solution « ecowizz » de la société Geroco : www.ecowizz.net/produit

⁴⁶³ Site web de eSmart Technologies : <http://myesmart.ch/fr/>

⁴⁶⁴ Site web de de Green Motion <https://greenmotion.ch>

⁴⁶⁵ Site web de NeoTechnologies : www.neo-technologies.ch

⁴⁶⁶ Site web de DEPSys : www.depsys.ch

❖ Cluster « *Horlogerie, produits de luxe, cosmétiques et parfums* ». La Suisse occidentale est le berceau suisse de l'horlogerie, des cosmétiques et autres produits de luxe. La région héberge nombre d'entreprises horlogères prestigieuses, réputées et prospères depuis des générations : Patek Philippe, Vacheron Constantin, Jaeger LeCoultre, TAG Heuer, Audemars Piguet ainsi que Rolex et Omega. Soulignons également que deux des trois leaders mondiaux du secteur de la parfumerie et des arômes, à savoir Givaudan et Firmenich, siègent à Genève.

❖ Cluster « *Services bancaires, financiers et commerciaux* ». Plus de 400 institutions financières et 150 banques étrangères sont établies en Suisse, dont une bonne partie en Suisse occidentale (et en particulier à Genève). Les acteurs régionaux de la finance, en particulier les entreprises de capital-risque et les business angels sont mieux informés sur les nouvelles technologies que dans d'autres centres financiers mondiaux, grâce à la concentration d'industries à haute valeur ajoutée établie à proximité immédiate, de dont pourrait bénéficier une plateforme technologique telle qu'un simulateur d'ECA.

❖ Cluster « *Sièges de sociétés et centres de services internationaux* ». La Suisse occidentale offre une forte densité de multinationales⁴⁶⁷ (près de 600 sièges ou bureaux d'importance sur son territoire et de nombreux départements de R&D, dont les principaux sont listés au §20.2.6), qui bénéficient de l'expertise de la région dans les domaines de l'innovation.

❖ Cluster « *Organisations internationales* ». Une multitude d'organisations internationales et non gouvernementales siègent dans la région, essentiellement à Genève, mais aussi à Berne et Lausanne, comme : 26 des agences de l'Organisation des Nations Unies (ONU)⁴⁶⁸ parmi lesquelles l'Organisation mondiale de la santé (OMS)⁴⁶⁹, l'Union internationale des communications (UIT)⁴⁷⁰ et l'Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI)⁴⁷¹ ; l'Organisation mondiale du commerce (OMC)⁴⁷² ; l'Organisation internationale de normalisation (ISO)⁴⁷³ ; le Fonds mondial pour la nature (WWF)⁴⁷⁴ ; l'International Federation of Pharmaceutical Manufacturer & Associations (IFPMA)⁴⁷⁵ ; les organisations sportives internationales majeures parmi lesquelles le Comité Internationale Olympique

⁴⁶⁷ Par exemple : ABB, Agilent Technologie, AstraZeneca, BNP Paribas, Cadbury Schweppes, Canon (Suisse), Celgene, Credit Suisse Group, Cisco, Daimler-Chrysler, Eaton, eBay, France Telecom R&D, GlaxoSmithKline, Hewlett Packard International, IBM, Johnson & Johnson, Leica microsystems, Logitech Inc., Lombard Odier Darier Hentsch, Mc Kinsey & Company, Medtronic, Microsoft research, Nestlé, Nestlé Research Center, Novartis, Novo Nordisk, Pepsico, Pfizer, PricewaterhouseCoopers, Procter & Gamble, Samsung Advanced Institute of Technology, Siemens Corporate Research, Sony Deutschland, STMicroelectronics, Sun Microsystems (Suisse), SwissRe, Syngenta Crop Protection, Toyota Motor Engineering & Manufacturing Europe.

⁴⁶⁸ Site web de l'ONU : www.un.org/fr

⁴⁶⁹ Site web de l'OMS : www.who.int/fr

⁴⁷⁰ Site web de l'UIT : www.itu.int/fr

⁴⁷¹ Site web de l'OMPI : www.wipo.int/adm/getlang.jsp?lang=fr

⁴⁷² Site web de l'OMC : www.wto.org/indexfr.htm

⁴⁷³ Site web de l'ISO : [www.iso.org/iso/fr/home.htm?="](http://www.iso.org/iso/fr/home.htm?=)

⁴⁷⁴ Site web du WWF : www.wwf.ch/fr/

⁴⁷⁵ Site web de l'IFPMA : www.ifpma.org

(CIO)⁴⁷⁶, l'Académie Internationale des Sciences et Technologies du Sport (AISTS)⁴⁷⁷, l'Agence Mondiale Antidopage (AMA)⁴⁷⁸ et la Maison du sport international (MSI)⁴⁷⁹, qui rassemble plus de 50 fédérations et organisations liées au sport international, ainsi qu'une dizaine d'entreprises actives dans le domaine du sport.

Enfin, signalons que plus de 200 missions permanentes étrangères sont établies à Genève et rappelons que le CERN est également installé dans la région.

20.2.4 Le soutien à l'innovation en Suisse occidentale

Afin de soutenir activement l'innovation en Suisse occidentale, la plupart de ces clusters technologiques sont soutenus activement par des plateformes de communication spécifiques et performantes, les clusters de promotions des technologies⁴⁸⁰, à savoir :

- *CleantechAlps*⁴⁸¹, cluster concentrant ses activités sur le renforcement de filières des écotechnologies de Suisse occidentale. Domaines clés : cleantech, écotechnologies, photovoltaïque, valorisation des déchets, smart grids, écologie industrielle et « enabling technologies » ;
- *Énergie-cluster*⁴⁸², l'association de branche des entreprises active dans l'énergie et les écotechnologies vertes. Domaines clés : énergie, écotechnologies ;
- *BioAlps*⁴⁸³, un des leaders européens des sciences de la vie et des biotechnologies. Domaines clés : sciences de la vie, biotechnologies, sciences omiques (protéomique et génomique), bioinformatique, imagerie biomédicale, oncologie ;
- *Medical Cluster*⁴⁸⁴, l'association de promotion des entreprises innovantes œuvrant dans les technologies médicales de toute la chaîne de valeur suisse. Domaines clés : technologies médicales ;
- *Swiss Food Research*⁴⁸⁵ est un consortium d'institutions de R&D au service de la compétitivité

⁴⁷⁶ Site web du CIO : www.wwf.ch/fr/

⁴⁷⁷ Site web de l'AISTS : www.aists.org

⁴⁷⁸ Site web de l'AMA : www.wada-ama.org

⁴⁷⁹ Site web de la MSI : www.msi-lausanne.ch/cms/index.php?lang=fr

⁴⁸⁰ La plupart de ces clusters proposent des bases de données répertoriant les acteurs clés de leur domaines respectifs. à l'image de celles de BioAlps (> 700 sociétés, laboratoires et facilitateurs sur www.bioalps.org/biotechnology/bioalps-database.html), de AlpICT (> 650 sur www.alpict.com/fr/acteurs/index.php?type=all) ou de Micronarc (> 900 sur www.micronarc.ch/f/industry/search.php).

⁴⁸¹ Site web du cluster CleantechAlps : www.cleantech-alps.com

⁴⁸² Site web de Energie-cluster : www.energie-cluster.ch

⁴⁸³ Site web du cluster BioAlps : www.bioalps.org

⁴⁸⁴ Sites webs du Medical Cluster : www.medical-cluster.ch, www.swiss-medtech.org

⁴⁸⁵ Site wen de Swiss Food Research : www.foodresearch.ch

de l'industrie agroalimentaire suisse et des secteurs économiques connexes ;

- *AlpICT*⁴⁸⁶, la plate-forme de Suisse occidentale pour les technologies de l'information et de la communication (TIC). Domaines clés : technologies de l'information et de la communication ;
- *Cluster précision*⁴⁸⁷ est une plateforme de promotion de l'industrie de précision. Domaines clés : industrie de précision, microtechnologies.
- *Micronarc*⁴⁸⁸, un centre d'excellence en micro et nanotechnologies. Domaines clés : microtechnologies, nanotechnologies ;
- *Information Systems & IT Cluster (ISIS)*⁴⁸⁹, un cluster dans les domaines des systèmes d'information. Domaines clés : systèmes d'information, multimédia, applications et sécurité informatiques.

Le soutien à l'innovation bénéficie dans la région d'un réseau dense de plateforme de transfert de savoir et de technologie entre sciences et industrie, avec par exemple :

- la *plateforme Innovaud*⁴⁹⁰, créée au printemps 2013, et dotée de 3 piliers : 1) *VaudParcs* : PSE, Y-Parc, Swiss Media Centers, Technopôles Nord (Sainte-Croix, Orbe), Ateliers Ville de Renens, etc. ; 2) *l'Association Innovaud* : activités de support aux autres piliers ; 3) la *Fondation pour l'Innovation Technologique*⁴⁹¹ (FIT) pour le financement des start-ups (Barbey & Lallement 2012; Leuba & Lyon 2012) ;
- le *PACTT*⁴⁹², bureau de transfert de technologie commun au CHUV et à l'UNIL, gère les aspects de propriété intellectuelle (dépôts de brevet), de négociation de contrats, de promotion des interactions entreprises/institutions académiques, de valorisation des résultats de recherche (contrats de licence, de recherche, de service) et de soutien à la création d'entreprises ;
- le *Réseau Alliance*⁴⁹³, un consortium de transfert de savoir et de technologies de Suisse romande et du Tessin. Il réunit plus de 6'000 chercheurs des hautes écoles et des hôpitaux universitaires dans les micro- et nanotechnologies, les TIC, les technologies biomédicales, les sciences de la vie et les technologies et sciences des matériaux ;
- le *Competence Centre for Materials Science and Technology*⁴⁹⁴ (CCMX), coordonne et fédère

⁴⁸⁶ Site web du cluster AlpICT : www.alpict.com

⁴⁸⁷ Site web du Cluster precision : www.cluster-precision.ch

⁴⁸⁸ Site web du cluster Micronarc : www.micronarc.ch

⁴⁸⁹ Site web du cluster ISIS : www.infosystems-security.ch

⁴⁹⁰ Site web de Innovaud : www.innovaud.ch

⁴⁹¹ Site web du FIT : www.fondation-fit.ch

⁴⁹² Site web du PACCT : www.pactt.ch

⁴⁹³ Site web d'Alliance TT : www.alliance-tt.ch/accueil

⁴⁹⁴ Site web du CCMX : www.ccmx.ch

les compétences de quatre institutions du domaine des EPF (EPFL, ETHZ, PSI, EMPA), avec le CSEM, afin d'établir des synergies entre les communautés scientifiques et industrielles dans les domaines des sciences des matériaux et de la technologie ;

- l'Agence fédérale de promotion de l'innovation (CTI)⁴⁹⁵, qui deviendra Innosuisse à l'horizon 2018, soutient des projets de transfert de technologies dans les « enabling sciences », par exemple en cofinçant des projets de R&D gérés conjointement par les entreprises et les universités, ou en coachant les start-ups en création ou en développement ;
- *Platinn*⁴⁹⁶ est une plateforme d'innovation qui offre des services de conseil stratégique aux start-ups et aux PME de Suisse occidentale (plan organisation, conduite des affaires, coopération, droit, accès aux programmes de cofinancement de projets, etc.) ;
- le *Pôle scientifique et technologique du canton de Fribourg* (PST-Fr)⁴⁹⁷ catalyse la mise en place des partenariats public-privé ;
- *Creapole*⁴⁹⁸ soutient la création d'entreprises, l'innovation et le transfert technologique dans le canton du Jura, dans les domaines suivants : medtech, TIC, nanotechnologies, et microtechnologies ;
- *Ecolosion*⁴⁹⁹ soutient des sociétés innovantes à fort potentiel dans les sciences de la vie (pharmaceutique, biotechnologie, technologies médicales, etc.) dans le canton de Genève ;
- *Fri-up*⁵⁰⁰ conseille les start-ups et les PME du canton de Fribourg et met en place des synergies entre monde économique, enseignement supérieur et État ;
- le *Swiss Integrative Center for Human Health* (SICHH)⁵⁰¹, un centre de compétence en santé humaine inauguré en octobre 2013 (voir §5.2.1.6.e) ;
- la *Fondation Genevoise pour l'Innovation Technologique* (FONGIT)⁵⁰², une structure de soutien aux start-ups technologiques à un stade précoce présentant un risque élevé (seed capital) ;
- le *Competence Center for Medical Technology* (CCMT)⁵⁰³ pour les synergies entre universités et industries dans le domaine des technologies médicales.

⁴⁹⁵ Site web du CTI : www.kti.admin.ch/?lang=fr

⁴⁹⁶ Site web de Platinn : www.platinn.ch

⁴⁹⁷ Site web du PST-FR : www.pst-fr.ch

⁴⁹⁸ Site web de Creapole : www.creapole.ch

⁴⁹⁹ Site web d'Ecolosion : www.eclosion.com

⁵⁰⁰ Site web de Fri Up : www.friup.ch/fr/

⁵⁰¹ Site web du SICHH : www.cish.ch/fr

⁵⁰² Site web de Fongit : www.fongit.ch

⁵⁰³ Site web du Competence Center for Medical Technology : www.ccmtech.ch

Citons encore l'Office de Promotion des Industries et des Technologies (OPI)⁵⁰⁴ à Genève, la Fondation pour le financement initial d'entreprises novatrices (Finergence)⁵⁰⁵ et la la Fondation Suisse pour la Recherche en Microtechnique (FSRM)⁵⁰⁶ à Neuchâtel, ainsi que TT-Novatech⁵⁰⁷, innoBE⁵⁰⁸, Unitectra⁵⁰⁹ à Berne.

Parmi les autres acteurs des pôles de compétences en technologies, mentionnons encore les associations économiques (« associations professionnelles de branche »), à l'image de Swiss cleantech, Cleantech Switzerland, etc.

Une sélection des clusters technologiques et des clusters de promotion des technologies clés dans le contexte d'Oikosmos ont été sélectionnés au §5.3.2.

20.2.5 Les incubateurs et les parcs scientifiques et technologiques de Suisse occidentale

La Suisse occidentale présente une concentration unique d'incubateurs et de parcs scientifiques et technologiques, à savoir :

- l'*EPFL innovation park* ou *parc scientifique PSE*⁵¹⁰ accueille plus de 130 start-ups⁵¹¹ et héberge par exemple le Nestlé Institute of Health Sciences, mais aussi des cellules R&D des entreprises Cisco, Constellium, Crédit Suisse, Debiopharm, Elca, Logitech, Nokia ou MD Start⁵¹² ;
- le *Y-PARC*⁵¹³, le *parc scientifique et technologique d'Yverdon*, un des plus grands parcs technologiques de Suisse avec de 110 entreprises et 1'400 collaborateurs répartis sur plus de 50 hectares de terrains dédiés aux activités de R&D et de production industrielle ;
- le *Biopôle*⁵¹⁴, offre 8 hectares au nord de Lausanne, pour créer des synergies entre les institutions de recherches publics et privés dans les sciences de la vie, une vingtaine de sociétés y sont installées, à proximité quasi immédiate du CHUV, de l'UNIL et de l'EPFL ;

⁵⁰⁴ Site web de l'OPI : www.opi.ch

⁵⁰⁵ Site web de Finergence : www.finergence.ch

⁵⁰⁶ Site web de la FSRM : www.fsrn.ch

⁵⁰⁷ Site web de TT-Novatech : ttnovatech.he-arc.ch

⁵⁰⁸ Site web de InnoBE : www.innoBE.ch

⁵⁰⁹ Site web de Unitectra : www.unitectra.ch

⁵¹⁰ Site web du PSE : <http://epfl-innovationpark.ch>

⁵¹¹ Start-ups du PSE et spin-off de l'EPFL : www.parc-scientifique.ch/community/companies/

⁵¹² Site web du Quartier de l'innovation :

www.parc-scientifique.ch/fr/environnement/le_quartier_de_l_innovation.php

⁵¹³ Site web de l'Y-PARC : www.y-parc.ch

⁵¹⁴ Site web du Biopôle : www.biopole.ch

- *TecOrbe*⁵¹⁵, le technopôle de l'environnement d'Orbe, dans le canton de Vaud ;
- le *parc scientifique et technologique Neode*⁵¹⁶, qui accueille start-ups et petites entreprises actives en micro et nanotechnologies à Neuchâtel et à La Chaux-de-Fonds ;
- *The Ark*⁵¹⁷, qui accompagne l'installation, l'éclosion et la croissance de sociétés dans le canton du Valais, avec 3 domaines technologiques: sciences de l'information et de la communication, sciences de la vie et sciences de l'ingénieur.
- le *Vivier*⁵¹⁸, un exemple d'incubateur privé. Le centre industriel de CPA Group vise toute entreprise orientée maîtrise technologique et innovation ;
- le *parc technologique de Saint-Imier*⁵¹⁹ regroupe des instituts, des start-ups et des PME spécialisées dans les microtechnologies et industries de précision (notamment en génie médical et horlogerie).

Au niveau national, *SwissParks.ch*⁵²⁰ est l'association suisse des incubateurs et des parcs technologiques. Fondée en 2000, elle réunit plus de 40 membres, et un total plus de 1'000 compagnies.

20.2.6 Les centres de recherches privés dans les hautes technologies

De nombreuses entreprises de la région sont actives dans les hautes technologies. Parmi les centres de recherches privés identifiés, signalons :

- le *Dupont European Technical Center*⁵²¹ (Meyrin, GE) : le principal centre de recherche de la société axé sur les polymères et les matériaux avancés : tissus de haute protection pour la prévention des risques thermique, chimique, biologique, abrasion et coupure.
- le *Centre de recherche biopharmaceutique* de Debio RP⁵²² (Martigny, VS) : recherche biopharmaceutique sur les systèmes d'administration de médicaments ;
- le *Centre de recherche de biotechnologie* de Lonza⁵²³ (Visp, VS) : recherche en biotechnologie avec site de production, de R&D, de ventes et de service après-vente ;
- le *Nestlé Research Center*⁵²⁴ (Lausanne, VD) : le siège du réseau de centres R&D de Nestlé

⁵¹⁵ Site web de TecOrbe : www.tecorbe.ch

⁵¹⁶ Site web de NEODE : www.neode.ch

⁵¹⁷ Site web de The Ark : www.theark.ch/fr/index.php

⁵¹⁸ Site web du Vivier : www.vivier.ch/

⁵¹⁹ Site web : www.saint-imier.ch/index.php?option=com_content&task=view&id=279&Itemid=551

⁵²⁰ Site web de SwissParks : www.swissparks.ch

⁵²¹ Site web du centre de recherche de Dupont : www2.dupont.com/inclusive-innovations/en-us/gss/science/technology/meyrin-switzerland.html

⁵²² Site web du centre de recherche de Debio : www.debio.com/about-us/debiopharm-group/debio-rp-sa.html

⁵²³ Site web du centre de recherche de Lonza : www.lonza.com/about-lonza/company-profile/locations-worldwide/visp-switzerland.aspx

⁵²⁴ Site web de Nestec : www.research.nestle.com

portant sur l'étude des effets bénéfiques de l'alimentation sur la santé des consommateurs ;

- le *Nestlé Institute of Health Sciences* (NIHS)⁵²⁵ (Lausanne, Quartier de l'innovation de l'EPFL, VD) : un centre de recherche agroalimentaire de Nestlé sur le lien entre santé et nutrition (alimentation et nutrition personnalisée, aliments, nutrigenomique) ;
- le *Food and Flavor Expertise Center de Firmenich*⁵²⁶ (Genève, GE) : un laboratoire de recherche appliquée, de développement produit et d'analyses sensorielles ;
- le *Novartis Animal Health R&D Center*⁵²⁷ (St Aubin, FR) : un laboratoire de R&D de recherche pharmaceutique ;
- le *Daniel Borel Innovation Center*⁵²⁸ (Lausanne, VD) : le principal site de R&D de Logitech (leader mondial des périphériques) sur les interfaces de nouvelle génération ;
- le *Nitto Denko Europe Technical Centre Sàrl*⁵²⁹ (NET) (Lausanne, VD) : un centre de R&D du fabricant japonais de matériaux avancés (écomatériaux et bio-based materials) ;
- le *HP Invent Center*⁵³⁰ (Meyrin, GE) : le site de « business innovation » de HP ;
- le *Cisco Research Center*⁵³¹ (Rolle, VD) : un centre de R&D Internet & Innovation, actif dans les TIC et l'informatique mobile ;
- le *Lancy Innovation Center de Procter & Gamble*⁵³² (Lancy, GE), actif dans l'agroalimentaire ;
- le *Chocolate Center of Excellence* de Nestlé⁵³³ (Broc, FR), dans le domaine de l'agroalimentaire et de l'analyse sensorielle.

⁵²⁵ Site web du centre de recherche du NISH : www.nestleinstitutehealthsciences.com/Pages/default.aspx

⁵²⁶ Site web de Firmenich : www.firmenich.com

⁵²⁷ Site web du centre de recherche de Novartis : www.ah.novartis.com/about/en/research_development.shtml

⁵²⁸ Site web de Logitech : www.logitech.com/fr-ch/home

⁵²⁹⁵²⁹ Site web du NET : www.nitto.com/dpage/225.html

⁵³⁰ Site web du centre de recherche de HP : www.hp.com/inventcenter/hpicgeneva

⁵³¹ Site web du centre de recherche de Cisco : www.cisco.com

⁵³² Site web du centre de recherche de Procter & Gamble : www.pg.com/fr_CH/

⁵³³ Communiqué de presse de Nestlé du 07.092009 : www.nestle.com/Media/PressReleases/Pages/AllPressRelease.aspx?PagelD=156

21 Les opportunités offertes par un simulateur d'ECA basé en Suisse occidentale

21.1 Les opportunités pour l'écosystème de l'innovation en Suisse occidentale

Il paraît essentiel que la structure organisationnelle et la stratégie opérationnelle favorisent au mieux le transfert de savoir et de technologie de volets applicatifs terrestres, et s'appuient sur l'écosystème de l'innovation autour de lui. Si les synergies de recherche constituent le coeur de cette future plateforme technologique, cet écosystème jouera un rôle clé pour catalyser les processus d'éco-innovation tout au long de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché.

Les Parties II et III ont détaillé quelques-unes des activités possibles d'un simulateur d'ECA en sa qualité respectivement de plateforme scientifique (synergies de recherche) et technologique (transfert de technologie) pour l'étude des systèmes clos dans le cadre du programme Oïkosmos. Ce chapitre explore les opportunités que pourrait offrir ce démonstrateur au sol pour l'écosystème de l'innovation de Suisse occidentale. Les caractéristiques et les activités d'un simulateur d'ECA ont été évaluées succinctement en distinguant quelles pourraient être les opportunités prioritaires à mettre en œuvre (potentiel et faisabilité élevés, avec un démarrage à court terme, etc.) avec les parties prenantes de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché de Suisse occidentale.

Le Tableau 2 dresse la liste des opportunités de R&D, de R&Da et de transfert de technologie d'une telle installation pour les acteurs en présence, discutées ci-après :

✧ *Opportunités pour l'Université de Lausanne (voir Tableau 2 : 3***, 4**).* Pour l'UNIL, les opportunités prioritaires (***) sont liées 1) aux coopérations interinstitutionnelles, en particulier celles favorisant les synergies de recherche, avec les groupes de recherche identifiés au §5.2.1.1, dans les domaines du biomédical, de l'environnement et de la psychologie ; 2) à la participation à une éventuelle interface Science-Société, 3) ainsi qu'à la conceptualisation de l'interdisciplinarité. D'autres opportunités intéressantes (***) sont envisageables, notamment dans le cadre des activités d'un futur Centre de compétences Oïkosmos et d'un possible Incubateur Oïkosmos.

Soulignons que le §24 propose des recommandations et des suggestions concrètes à la Direction de l'UNIL pour poursuivre le développement d'activités liées au programme Oïkosmos.

OPPORTUNITÉS (synergie de recherche & transfert de technologie)		PARTIES PRENANTES DE SUISSE OCCIDENTALE										Secteur spatial suisse	ESA
		UNIL	Autres instit. de rech. acad. ⁽¹⁾	Plateformes techn. (sciences de la vie)	PME/multinat. ⁽²⁾	Start-ups ⁽²⁾	Clusters de prom. des technol. ⁽³⁾	Plateformes de transf. de technol. ⁽⁴⁾	Incubateurs / Parcs scientif. & technol. ⁽⁵⁾	Centres de rech. privés (hautes technol.)			
Structure ouverte (coopérations, interinstitutionnelles)		***	***	*	**	**	*	*	*	*	*	**	***
		*	*	**	*	***	-	*	**	*	*	**	***
Installation flexible et dynamique (mutualisation des ressources physiques)		***	**	-	-	-	*	-	-	-	-	-	***
		*	***	**	***	**	*	*	*	*	*	**	***
Forum Oikosmos (promotion des systèmes clos)		**	**	*	**	**	**	**	**	**	**	*	**
		**	**	*	*	**	*	*	*	*	*	*	**
Centre de compétences Oikosmos (expertise sur les systèmes clos)		**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**
		**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**
Incubateur Oikosmos (catalyseur des processus d'éco-innovation)		**	**	*	*	*	*	*	*	*	*	*	**
		*	**	-	**	**	***	**	**	**	**	**	***
Plateforme intégrative		***	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		*	**	-	-	-	*	*	*	*	*	*	*
Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos		*	*	-	-	-	-	-	-	-	-	-	*
		**	**	-	*	*	-	-	-	-	-	**	*
Sciences participatives et innovation ouverte		**	**	-	*	*	*	*	*	*	*	**	*

Critères	Priorité	Potentiel / Faisabilité	Fréquence	Décal avant démarrage
-	non pertinent	quasi inexistant	non pertinent	(long terme)
*	pertinente	faible	rare	long terme
**	importante	modéré	sur une base occasionnelle	moyen terme
***	prioritaire	élevée	fréquent	court terme

- 1) y compris CHUV, EPFL et CSEM
- 2) issues des clusters technologiques clés
- 3) CleantechAlps, BioAlps, AlpiCT, Micronac, etc.
- 4) InnoVaud, PACTT, etc.
- 5) VaudParks, incubateurs privés, etc.

Tableau 2: Opportunités d'un simulateur d'ECA pour les parties prenantes de Suisse occidentale.

◇ *Opportunités pour les autres institutions de recherche académique (voir Tableau 2 : 3***, 4**).* Au niveau des autres institutions de recherche académique actives dans la région (en particulier celles plus orientées R&D appliquée, comme l'EPFL, le CSEM, etc.), l'établissement de synergies et la participation à une éventuelle plateforme Science-Industrie présentent un intérêt certain, sans oublier celui de l'Incubateur Oïkosmos, de par l'accès à des partenaires, clients ou investisseurs potentiels. De plus, le renforcement des collaborations d'institutions de recherche suisses avec un programme comme Oïkosmos permettrait de s'aligner sur les recommandations du « Masterplan Cleantech de la Confédération »⁵³⁴. Ce dernier vise notamment à favoriser le « développement d'une approche et de solutions systémiques : créer des incitations pour rassembler les compétences fragmentées des instituts de recherche dans des centres d'excellence et de compétences ou des réseaux avec allocation correspondante de moyens » (DFE 2011). En outre, on peut considérer que le simulateur d'ECA comme un instrument pour tester des solutions et des applications permettant de mettre en œuvre la vision de la « Société à 2000 watts » de la Confédération helvétique⁵³⁵.

◇ *Opportunités pour les plateformes technologiques (voir Tableau 2 : 3**).* Tant les prestations d'un éventuel Centre de compétences Oïkosmos (§14) et que le rôle d'incubateur d'un futur simulateur d'ECA (§15) pourraient être à l'origine de synergies et favoriser de nouvelles interactions avec les nombreuses plateformes technologiques existantes de Suisse occidentale (§5.2.1.7 et §20.2.2), à proximité quasi immédiate.

◇ *Opportunités pour les PME/multinationales (voir Tableau 2 : 1***, 3**).* L'industrie suisse tisse des liens toujours plus étroits avec ses centres de recherche, les vecteurs de l'innovation indispensables au maintien de leur compétitivité pour affronter les challenges du futur⁵³⁶. Un simulateur d'ECA pourrait se profiler comme une plateforme ouverte aux industries, sur le modèle du CSEM (voire de l'EMPA), dont le financement de l'utilisation peut être assuré en partie par des mandats industriels. Les PME et multinationales disposeraient d'une plateforme Science-Industrie (§13) fort pertinente pour développer certaines de leurs activités de R&D ou de transfert technologique de manière ciblée, également en participant à des programmes internationaux. Signalons par exemple que dans les domaines des biotechnologies et de la microtechnique – domaines pour lesquelles les compétences de la Suisse

⁵³⁴ La problématique des cleantechs suscite depuis une dizaine d'années un intérêt croissant de la part de divers milieux, notamment économiques et politiques (voir §7.4.1). Après les stratégies cleantech de l'Union européenne, de la France, et d'autres pays, la publication du « Masterplan Cleantech » en 2011-2012 de la Confédération, bien que relativement tardive, apparaît comme une contribution bienvenue et même cruciale pour clarifier la stratégie et les ambitions de la Suisse dans ce domaine.

Site web du Masterplan : www.cleantech.admin.ch/cleantech/?lang=fr

⁵³⁵ Site web de la Société à 2000 watts : www.2000watt.ch/fr/

⁵³⁶ Le directeur Marketing et Développement du CSEM, Georges Kotrotsios estime par exemple qu'« en Suisse, nous sommes davantage capables de prendre des idées du côté de l'académie, de les faire mûrir par l'ingénierie et de les combiner avec le secteur des medtechs par exemple, de façon à ce qu'un produit sorte de ce mariage ». Ces inventions transformées en innovation par les centres de recherche permettent aux connaissances académiques d'atteindre la maturité nécessaire à son industrialisation et à la concrétisation en succès sur le marché.

occidentale sont mondialement reconnues – des entreprises comme RUAG développent et fabriquent en Suisse des bioréacteurs requis pour conduire des recherches sur les ALSS dans l’ISS, via un financement MELISSA lié au budget de la Swiss Space Office lié. En parallèle, un démonstrateur d’ECA telle structure pourrait bien arriver à un moment judicieux pour des institutions qui ont investis massivement dans des plateformes classiques et qui désirent dorénavant développer de nouvelles formes d’interactions. La plateforme technologique permettrait de réunir et faire interagir les institutions académiques, les HES et le monde industriel, avec le soutien des politiques, au sein de plateforme de recherche intégrative « 2.0 ». Des mécanismes de soutien suisse ou européen pourraient être mis en place en son sein, comme instruments incitant à la création de start-ups dans les domaines toucheraient aux appareillages médicaux, aux équipements bioanalytiques, à la microtechnique, à la production d’applications portables, à la pharmaceutique, aux cleantech, etc.

✧ *Opportunités pour les start-ups (voir Tableau 2 : 3***, 4**).* L’environnement autour du simulateur d’ECA pourrait servir à l’incubation des start-ups de Suisse occidentale développant des technologies associées aux systèmes clos (parmi les clusters identifiés au §5.3.2) en leur permettant de mutualiser leurs ressources, et de bénéficier de prestations de coaching et de soutien à l’innovation. À travers l’Incubateur Oïkosmos, les jeunes pousses de la région actives par exemple dans les systèmes de recyclages des eaux usées, la production de nourriture, le smart monitoring ou de l’ pourraient tirer profit de l’accès à des partenaires, clients ou investisseurs potentiels (§15).

✧ *Opportunités pour les clusters de promotion des technologies (voir Tableau 2 : 2***).* L’hébergement d’un simulateur d’ECA en de Suisse Occidentale donnerait accès à une plateforme technologique opérant à la convergence de dynamiques technologiques et mettant en pratique l’interdisciplinarité. L’incubateur pourrait alors tirer parti des clusters de promotion des technologies telles que CleantechAlps, BioAlps, MicronArc et AlpICT et servir de vitrine des compétences d’innovation technologique et de la qualité « made in » ou « hosted in Switzerland » (« swissness ») dans le déploiement, la diffusion et le succès d’applications dans les domaines des cleantech, medtech, biotech, microtech, etc. Ajoutons qu’un développement d’Oïkosmos renforcerait encore la visibilité et les réseaux pour plusieurs clusters technologiques stratégiques régionaux comme celui de la « Health valley lémanique » de par son volet dédié aux sciences de la vie.

✧ *Opportunités pour les plateformes de transfert de technologie (voir Tableau 2 : 2***, 2**).* En parallèle, les prestations de soutien à l’innovation de plateformes de transfert de technologie comme Innovaud, le PACTT ou le réseau Platinn permet aux acteurs d’Oïkosmos d’explorer et monter de projets de développement technologique en étroite collaboration avec ceux de l’écosystème de l’innovation de Suisse occidentale.

✧ *Opportunités pour les incubateurs et les parcs scientifiques et technologiques (voir Tableau 2 : 2***, 4**).* En plus de l’accès à un coaching et à des partenaires et investisseurs potentiels, de nombreuses

opportunités de collaboration, de mutualisation d'équipements, d'accès à des investisseurs, clients et autres partenaires sont envisageables entre les incubateurs et/ou les parcs technologiques de la région et les activités du simulateur d'ECA, propice au transfert de savoir et de technologie d'applications liées au système clos.

✧ *Opportunités pour les centres de recherche privés (voir Tableau 2 : 2**).* Des collaborations entre les centres de recherche privés de la région actifs dans les hautes technologies (hors spatial) avec un éventuel Centre de compétences Oïkosmos, ainsi que du Forum Oïkosmos leur donneraient un accès à l'expertise sur les systèmes clos et leur permettraient d'échanger de bonnes pratiques ou encore d'externaliser certains projets de recherche.

✧ *Les relations des parties prenantes de Suisse occidentale avec le simulateur d'ECA.* En complément des opportunités identifiées au Tableau 2, les relations possibles des parties prenantes de Suisse occidentale avec le simulateur d'ECA sont décrites au Tableau 3. Certains acteurs de la région pourraient par exemple devenir clients du simulateur et bénéficier de ses prestations variées en tant que laboratoire expérimental sur les systèmes clos, centre de compétences, incubateur, plateforme technologique, forum, etc. Premièrement, ces services s'adresseraient aux institutions de recherche académique comme l'UNIL, l'EPFL, le CSEM, etc., qui pourraient pour y établir des synergies de recherche et y déployer des activités de transfert de technologie. Ces mêmes institutions pourraient d'ailleurs participer à la phase de conception et de design tant de l'agenda de recherche que du simulateur. En tant qu'incubateur, le simulateur d'ECA pourrait offrir en parallèle des prestations de soutien à l'innovation à l'attention de start-ups actives dans le développement de technologies associées aux ALSS. Sans oublier la possibilité d'offrir l'expertise de l'équipe d'un centre de compétences à des PME innovantes et des multinationales basées en Suisse occidentale (en particulier celles ne disposant pas de leur propre cellule de R&D) désirant externaliser certaines activités de R&D et de R&Da. En retour, les parties prenantes de l'innovation à l'échelle régionale pourraient fournir des prestations de services et de produits utiles en intervenant à différentes phases de déploiement du simulateur : le CSEM pourrait par exemple faciliter la mise en place de partenariats public-privé ; les autres plateformes technologiques alentour pourraient mettre en place un système de mutualisation des équipements ; certaines PME et multinationales – en particulier, mais pas exclusivement celles du secteur spatial suisse – pourraient être amenées à participer à la construction, à l'exploitation et à la maintenance opérationnelle ; les clusters de promotion des technologies et les plateformes de transfert de technologie ne manqueraient pas d'accompagner la démarche en offrant des prestations gratuites permettant de lever des financements supplémentaires et de faciliter l'obtention de subvention à l'échelle locale, régionale, suisse et européenne ; et le réseau d'incubateurs et de parcs scientifiques et technologiques saura fournir ponctuellement des soutiens provenant de ses coaches dont certains pourraient être mis en commun avec ceux de l'incubateur Oïkosmos.

PARTIES PRENANTES DE SUISSE OCCIDENTALE											Secteur spatial suisse	ESA
A. RELATION DE LA PARTIE PRENANTE (avec les activités d'un simulateur d'ECA)		UNIL	Autres inst. de rech. Acad. (1)	Platef. techn. (sciences de la vie)	PME/multinationales (2)	Start-ups (2)	Clusters de prom. des technol. (3)	Platef. de transf. de technol. (4)	Incubateurs / Parcs scientif. & technol. (5)	Centres de rech. privés (hautes technol.)		
Client (bénéficiaire de services proposés par le simulateur d'ECA)		***	***	*	**	***	-	-	-	*	*	***
Prestataire de services et de produits		*	**/(**CSEM)	**	**	*	**	**	**	**	**	***
PARTIES PRENANTES DE SUISSE OCCIDENTALE											Secteur spatial suisse	ESA
B. PHASE D'INTERVENTION DE LA PARTIE PRENANTE		UNIL	Autres inst. de rech. Acad. (1)	Platef. techn. (sciences de la vie)	PME/multinationales (2)	Start-ups (2)	Clusters de prom. des technol. (3)	Platef. de transf. de technol. (4)	Incubateurs / Parcs scientif. & technol. (5)	Centres de rech. privés (hautes technol.)		
Conception & Design (agenda, simulateur)		**	**	-	*/***	-	(*)	(*)	-	-	-	***
Construction (y compris équipements)		(*)	*	*	**	*/**	-	-	-	-	-	***
Exploitation et maintenance opérationnelle (y compris synergie de recherche et transfert technologique)		**/(***)	**/(***)	*	**	**/(***)	(*)	(*)	*	*	*	***

1) y compris CHUV, EPFL et CSEM (principalement en terme de R&D appliquée)

2) des clusters technologiques clés

3) CleantechAlps, BioAlps, AlpICT, Micronarc, etc.

4) ImmoVaud, PACTT, etc.

5) VaudParks; incubateurs privés, etc.

Tableau 3: Relations possibles des parties prenantes de Suisse occidentale avec le simulateur d'ECA (a) et leur phase d'intervention (b).

21.2 Les opportunités pour le secteur spatial suisse

21.2.1 La politique spatiale suisse

La Suisse est membre fondateur de l'Agence spatiale européenne, et a récemment présidé la conférence des ministres européens de l'espace, conjointement avec le Luxembourg, pour le triennat 2012-2015⁵³⁷. Elle participe aux activités de l'Agence à hauteur d'environ 150 millions de francs par année⁵³⁸. Le domaine Affaires Spatiales⁵³⁹, dépendant du Secrétariat d'État à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI), est le centre de compétence de la Confédération pour les questions nationales et internationales relevant du spatial. Cette « Swiss Space Office » (SSO) est dirigée depuis 2012 par Daniel Neuenschwander, également Chef de la Délégation suisse à l'ESA (Roten & Frei 2012). La SSO « propose et met en œuvre la politique spatiale de la Suisse, en étroite collaboration avec d'autres offices et départements. La Suisse déploie ses activités spatiales essentiellement dans le cadre de sa participation aux programmes de l'ESA, participation qui permet aux entreprises, aux institutions et aux chercheurs suisses actifs dans le domaine spatial d'accéder à l'espace, aux sciences spatiales et aux technologies et services satellitaires. »⁵⁴⁰.

Les programmes principaux de la SSO incluent un volet « Vols spatiaux habités, microgravité et exploration spatiale »⁵⁴¹, qui englobe la participation de la Suisse à des programmes comme ELIPS et AURORA (voir §4.2.1.1). Ceux-ci permettent à la communauté scientifique et aux industriels suisses de prendre part au développement de technologies, à la construction de composants matériels et d'instruments spécialisés, à la mise au point des expériences qui s'appliquent dans le cadre des activités de la Station spatiale internationale (ISS), ainsi qu'aux projets d'exploration robotique et humaine du système solaire, par exemple dans le cadre de la mission ExoMars⁵⁴². La SSO finance ponctuellement

⁵³⁷ Lire à ce sujet l'interview du secrétaire d'Etat à la recherche, M. Mauro Dell'Ambrogio, chef de la délégation helvétique paru dans Le Temps du 17 novembre 2012 : www.letemps.ch/Page/Uuid/240b9352-302c-11e2-b7fd-42fb5ceb82b1/La_Suisse_prend_la_tête_du_domaine_spatial_européen

⁵³⁸ Voir le Communiqué de presse du Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche du 21.11.2012 : www.news.admin.ch/message/index.html?lang=fr&msg-id=46817.

Selon le Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation (SEFRI) : « [g]râce à cet investissement, les EPF, universités, hautes écoles spécialisées et l'industrie suisse ont la possibilité de travailler sur des missions spatiales à plusieurs niveaux, allant de la recherche scientifique de pointe au développement de prototypes et à l'industrialisation. Les avancées technologiques accomplies au niveau national ainsi que l'excellence des instruments développés dans les secteurs liés à l'espace contribuent au renforcement et au positionnement de la Suisse en matière de recherche et innovation. Les connaissances et le savoir-faire technologique acquis permettent également le développement de produits dérivés des applications spatiales qui sont d'usage courant et qui ont une forte valeur ajoutée dans des domaines variés, tels que les transports, l'agriculture et la gestion de l'environnement. »

⁵³⁹ Site web du domaine des Affaires spatiales (SSO) : www.sbf.admin.ch/themen/01371/index.html?lang=fr

⁵⁴⁰ *ibid.*

⁵⁴¹ Site web du volet « Vols spatiaux habités, microgravité et exploration spatiale » : www.sbf.admin.ch/themen/01371/01504/index.html?lang=fr

⁵⁴² Les entreprises et instituts suisses ayant un contrat avec l'ESA (Swiss ESA Contractors) est téléchargeable sur le site de la SSO :

www.sbf.admin.ch/themen/01371/01510/index.html?lang=fr&download=NHZLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1ae2IZn4Z2qZpnO2YUq2Z6gJCDeoJ9e2ym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

certaines activités liées au projet MELiSSA (voir par exemple les activités de la Fondation MELiSSA au §13), et également des projets ALSS d'industriels comme RUAG Space, qui collabore depuis des années avec MELiSSA sur le développement de photobioréacteurs de nouvelles génération et de manière ponctuelle sur la caractérisation de la nourriture produite par un ECA (RUAG, 2014).

La politique spatiale suisse (2008) poursuit les objectifs stratégiques, qui semblent compatibles avec l'encouragement d'un projet comme Oïkosmos⁵⁴³ : « a. Consolider et développer les participations aux infrastructures spatiales d'applications et services pour les besoins institutionnels suisses, y compris dans les domaines de la météorologie et la climatologie, de l'environnement, de la navigation, du transport, des télécommunications, du développement et de la sécurité ; b. Renforcer la place des scientifiques suisses à l'avant-garde de la science spatiale mondiale ; c. Maximiser les retours sur investissement dans les technologies spatiales pour la place économique suisse et une industrie forte ; (...) f. Améliorer la position de la Suisse en Europe en définissant des instruments alternatifs permettant des activités nationales ainsi que des coopérations bi- et multilatérales. ». Bien que plusieurs années se soient écoulées depuis la dernière révision de cette politique en 2008, on peut considérer que bien des éléments soulevés restent d'actualité en 2015⁵⁴⁴. Malgré le fait qu'elle soit compétitive, expérimentée et renommée au plan international, la politique souligne l'importance que l'industrie spatiale suisse « relèv[e] le défi de poursuivre sa mutation sans tarder pour pouvoir se positionner favorablement à court et moyen terme. En première priorité, il est indispensable d'augmenter ses investissements dans les nouvelles technologies en faveur de ses compétences clés et qu'elle fasse l'effort de mieux se coordonner à l'échelon national afin d'être à même d'offrir davantage de compétences au niveau des petits systèmes ou sous-systèmes. ». Et d'ajouter au sujet du contexte du marché spatial : « [L]es compétences-phare de l'industrie suisse, où sa part de marché est très appréciable, sont basées prioritairement sur la mécanique, l'électromécanique, les structures, et les systèmes sols classiques. Ces compétences sont soumises à une compétition grandissante si bien que ses perspectives de croissance sont faibles. La part du marché spatial qui a le plus fort potentiel de croissance concerne la charge utile et surtout les applications spatiales qui comprennent du matériel high-tech ainsi que le traitement et la valorisation des données spatiales. ». La Suisse souhaite participer au plus haut niveau à la construction d'une Europe spatiale compétitive et souveraine au service de la société et de ses besoins en contribuant « [a]u développement et à l'utilisation des applications spatiales pour l'amélioration de la qualité de vie

⁵⁴³ Téléchargeable sur le site de la Swiss Space Office :

www.sbf.admin.ch/themen/01371/01417/index.html?lang=fr&download=NHZLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1ae2IZn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCDeoF_gWym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

⁵⁴⁴ Les activités générales y sont résumées ainsi : « [L]'industrie suisse développe des produits compétitifs de très hautes qualifications (structures de satellites, coiffes de lanceurs, horloges atomiques, électronique embarquée, instruments scientifiques, etc.) dont le potentiel d'innovation va bien au-delà du secteur spatial et les équipes de recherche, dans la majorité des hautes écoles suisses, non seulement exploitent les données de missions scientifiques, mais développent, avec l'industrie suisse, de nombreux instruments scientifiques spatiaux de pointe. Les domaines de recherche vont de l'astronomie à la physiologie humaine en apesanteur, de l'étude des comètes à la biologie spatiale, et de la recherche sur le climat à l'hydrologie de la neige et à la cartographie forestière ».

de [ses] citoyens » (Secretariat d'Etat à l'éducation et à la recherche 2008). En collaborant au un programme de recherche Oïkosmos, le pays pourrait aller compléter cette ambition par des contributions scientifiques, technologiques et/ou industrielles favorisant le développement et l'utilisation d'applications *terrestres* basées sur la recherche et les technologies spatiales sur les ALSS.

21.2.2 Les institutions de recherche du secteur spatial suisse

En termes de recherche scientifique dans le domaine du spatial, la Suisse dispose d'une solide palette de compétences et est reconnue pour la qualité, tant au niveau de la R&D fondamentale qu'appliquée. Les institutions de recherche suisses sont leaders dans certains domaines spécifiques, comme les microsattellites (EPFL) ou les exoplanètes (UNIGE). Une de leurs principales forces est de disposer d'un savoir-faire solide sur toute la chaîne de projets spatiaux scientifiques, c'est-à-dire tant dans les phases de conception et de développement, que de production et d'exploitation. Tous les types de hautes écoles sont impliqués, parmi lesquelles, en Suisse occidentale :

- l'*École polytechnique fédérale de Lausanne* héberge le « Swiss Space Center »⁵⁴⁵ qui a notamment lancé du microsattellite SwissCube en 2009. Le centre encourage la recherche spatiale et facilite l'accès aux applications spatiales aux organisations académiques et industrielles suisses en les soutenant dans la préparation et la réalisation de projets relatifs au spatial ou l'établissement de coopérations interinstitutionnelles au niveau national et international, sur des thématiques émergentes ;
- l'*Université de Genève*, avec notamment son observatoire astronomique⁵⁴⁶ et l'*Integral Science Data Centre* (ISDC, centre mondial des données du satellite d'observation des rayons gamma de l'ESA)⁵⁴⁷ ;
- l'*Université de Lausanne*, avec son groupe écologie industrielle de l'Institut des dynamiques de la surface terrestre, et membre du consortium MELiSSA depuis 2015⁵⁴⁸ ;
- le Centre suisse d'électronique et de microtechnique (capteurs et senseurs d'images)⁵⁴⁹ ;
- les hautes écoles spécialisées, comme l'*Institut d'automatisation industrielle* (IAI) de la *HEIG-VD*⁵⁵⁰ ou la *HES-SO Valais*⁵⁵¹ (électronique) ;

⁵⁴⁵ Site web du Swiss Space Center : <http://space.epfl.ch/>

⁵⁴⁶ Site web de l'Observatoire astronomique : www.unige.ch/sciences/astro/

⁵⁴⁷ Site web de l'ISDC : <http://isdc.unige.ch>

⁵⁴⁸ Site web du groupe écologie industrielle (UNIL) : www.unil.ch/Jahia/site/idyst/op/preview/pid/101707

⁵⁴⁹ Site web du CSEM : www.csem.ch

⁵⁵⁰ Site web de l'IAI : www.iai.heig-vd.ch/fr-ch/Accueil/Pages/Accueil.aspx

⁵⁵¹ Site web de la HES-SO- Valais : www.hevs.ch

- l'Université de Berne (Space research and planetary sciences division)⁵⁵² ;
- l'International Space Science Institute ⁵⁵³ à Berne pour l'évaluation internationale et interdisciplinaire de missions spatiales ;
- le Musée d'histoire naturelle de Berne⁵⁵⁴ (recherches sur les météorites).

Dans le reste de la Suisse, relevons encore : la *Hochschule Luzern* (Biotechnology Space Support Center)⁵⁵⁵ ; l'Université de Zurich (Space biotechnology division)⁵⁵⁶ ; l'Observatoire de physique et de météorologie de Davos (recherches climatiques à l'échelle globale)⁵⁵⁷ ; et le *National Point of Contact for Satellites Images* (NPOC)⁵⁵⁸ basé à l'Université de Zurich (utilisation coordonnée des données de satellites d'observation de la Terre).

21.2.3 Les opportunités liées à la mise en œuvre de la politique spatiale nationale

✧ Le « Swiss Space Implementation Plan »

Un récent plan d'action, le « Swiss Space Implementation Plan within Education, Research and Innovation for 2014-2023 » (SSIP), vise précisément à mettre en œuvre la politique spatiale nationale (2014)⁵⁵⁹, en renforçant la compétitivité du secteur spatial suisse et en le rendant plus innovant. Il se concentre sur trois grands domaines, à savoir les technologies, les champs d'excellence actuels et les thèmes émergents, et propose des mesures. La pertinence de ces domaines dans le contexte d'Oïkosmos est brièvement discutée ci-après.

Tout d'abord, relevons que les technologies spatiales prioritaires semblent relativement éloignées à celles associées à un démonstrateur technologique simulant un ECA, à l'image de celles touchant aux mécanismes de haute précision, aux horloges atomiques, ou à la transmission de données électro-optiques. Toutefois, le volet « Technologies pour les instruments scientifiques » pourrait présenter des liens indirects.

⁵⁵² Site web du SRPB : space.unibe.ch

⁵⁵³ Site web de l'ISSI : www.issibern.ch

⁵⁵⁴ Site web du NMBE : www.nmbe.ch

⁵⁵⁵ Site web du BIOTEC : www.hslu.ch/t-biotesc

⁵⁵⁶ Site web de la Space biotechnology division :

www.anatom.uzh.ch/research/Appliedanatomy-1/researchgroupSpaceBiotechnology-2.html

⁵⁵⁷ Site web du PMOD: www.pmodwrc.ch

⁵⁵⁸ Site web du NPOC : www.npoc.ch

⁵⁵⁹ Téléchargeable sur le site de la Swiss Space Office :

www.sbf.admin.ch/themen/01371/01417/index.html?lang=fr&download=NHZLpZeg7t,lnp6I0NTU042I2Z6ln1ae2IZn4Z2qZpnO2YUq2Z6gpJCEdYJ9hGym162epYbg2c_JjKbNoKSn6A--

En ce qui concerne les champs d'excellence actuels, le programme Oikosmos pourrait s'inscrire dans le volet « Science et exploration », même si aujourd'hui les domaines de recherches traitent principalement de thématiques comme la cosmologie, l'astrophysique, les sciences planétaires et la télédétection, plutôt que de la préparation de vols habités. Idem pour le volet « Applications » qui est orienté vers le développement d'applications dans les domaines de la cartographie, de la télécommunication et de la météorologie. De manière intéressante, le plan d'implémentation encourage la mise en place de collaborations entre acteurs suisses du spatial (institutions de recherche, PME, grandes compagnies) de type « bottom-up », car ce type d'approche convient bien au secteur spatial suisse. Il stipule que le développement de niches technologiques et la stimulation de domaines d'excellence spécifiques pourraient s'effectuer, en particulier s'ils exploitent le savoir-faire suisse en matière de sécurité alimentaire, d'aide humanitaire ou de lutte contre les changements climatiques, et ses compétences spécifiques en tant que pays alpin, autant de thématiques à même de retenir l'attention des politiques et décideurs du secteur spatial. Or, un simulateur d'ECA permet précisément de questionner ces problématiques et de participer au développement de solutions en la matière, respectivement en étudiant l'effet de perturbations des conditions environnementales sur des écosystèmes miniaturisés (§7.3), en développant des systèmes de recyclage décentralisés qui présentent un intérêt sanitaire, économique et environnemental pour les pays en développement (§7.4.2), et en développant des systèmes de production de nourriture rapide et efficace, fournissant une alimentation riche en (micro)nutriments (§8.3.1), et capable de valoriser matériellement les déchets végétaux non comestibles (§7.4.4).

Le plan d'implémentation aborde également des thèmes émergents, comme les petits satellites (moins de 300 kg) et la miniaturisation. Dans ce domaine, la Suisse semble très bien positionnée à l'internationale, avec des coopérations entre industries et institutions académiques, sur le modèle de celles mises en place par le CSEM (§5.2.1.4). Le fonctionnement d'un ECA nécessitant un hardware conséquent, la miniaturisation de ses équipements et appareillages se révèle donc cruciale. Par voie de conséquence, il semble des thèmes comme les écosystèmes clos, à la fois miniaturisés et hypermonitorés, s'inscriraient bien dans ce volet du plan d'implémentation.

Dans le cadre de ses révisions triennales, le SSIP devrait investiguer des thèmes émergents comme le nettoyage de débris spatiaux. Il semble pertinent d'explorer dans quelle mesure les systèmes clos (écosystèmes et/ou habitats clos) pourraient être considérés comme un thème émergent en soi, en particulier pour des thématiques capitalisant sur le savoir-faire et les compétences suisses en termes de miniaturisation (appliqués par exemple aux systèmes de monitoring avancés de paramètres biologiques, physiques ou chimiques). Un tel volet « Miniaturisation appliquée aux systèmes clos » permettrait ainsi de positionner l'excellence suisse des secteurs clés comme la microtechnique et l'ingénierie de précision, les medtech, la biologie systémique et les TIC.

Enfin, le rapport présente des mesures dédiées telles que « Business incubation » et « Partenariats public-privé » (PPP). Dans la première, le développement d'une initiative d'incubateur spatial est

évoqué, notamment, afin de réduire les coûts et les risques entre les expérimentations en laboratoires et la démonstration technologique, ceux-ci étant particulièrement élevés dans pour les start-ups et spin-offs du secteur technologique spatial. Rappelons qu'un intérêt des technologies associées aux ALSS réside aussi dans leur potentiel terrestre, avec une adaptation au spatial se déroulant pour certaines applications uniquement dans un deuxième temps. La préparation au sol de missions spatiales habitées pourrait servir d'étape intermédiaire, pour des études de faisabilité à des coûts plus supportables par rapport aux technologies spatiales. L'établissement de PPP est pertinent dans la perspective d'Oïkosmos, afin d'exploiter au mieux les surfaces et équipements, l'expertise des spécialistes du simulateur d'ECA (voir Partie III et §21.1).

Relevons encore qu'un Aéroport⁵⁶⁰ est en cours de développement à Payerne d'ici à 2016, avec des activités de sociétés comme Swiss Space System (S3)⁵⁶¹. L'Incubateur Oïkosmos s'inscrirait adéquatement dans un projet de pôle technologique en matière d'industrie aéronautique qui s'est positionné jusqu'ici dans le domaine des solutions autonomes.

Ajoutons enfin que la plateforme *IAP*⁵⁶² *Ambassador Platform for Switzerland (AP-Swiss)*⁵⁶³, a été lancée récemment par l'ESA et la Swiss Space Office. Basée au Quartier de l'innovation de l'EPFL, elle vise à encourager l'émergence et le développement d'applications intégrées, ainsi que l'amélioration des services, avec et pour l'industrie suisse. Son rôle consiste à promouvoir la valeur ajoutée des technologies spatiales auprès des acteurs de l'économie, stimuler l'émergence de nouvelles idées et services, soutenir la création de partenariats internationaux et se positionner à l'interface de l'ESA et de parties prenantes suisses. La plateforme AP-Swiss se profile comme un acteur pertinent développer sur des thématiques connexes à Oïkosmos⁵⁶⁴, et obtenir des financements de l'ESA pour des études de faisabilité, des activités de démonstration et des validations marché. Sa présence en Suisse occidentale est argument supplémentaire en faveur d'un développement des activités d'Oïkosmos dans la région.

Le déploiement du programme Oïkosmos dans la région inciterait de nouvelles entreprises et industriels de toutes tailles à collaborer avec le secteur spatial suisse et/ou l'ESA. Même s'il faut reconnaître que certaines des opportunités directes pour le secteur spatial suisse viendraient plutôt dans un deuxième

⁵⁶⁰ Site web du pôle technologique Aéroport : www.aeropole.ch

⁵⁶¹ Inaugurée en 2013, l'objectif de cette société est de « développer, construire, certifier et opérer des navettes suborbitales pour le déploiement de petits satellites jusqu'à 250 kg ». Site web de Swiss Space Systems : www.s-3.ch

⁵⁶² L'*Integrated Applications Promotion Programme (IAP)* de l'ESA, soutient le développement et la validation de services opérationnels liés de systèmes spatiaux (télécommunication, navigation, observation de la Terre, technologies liées aux missions habitées) et non spatiaux.

⁵⁶³ Site web de AP-Swiss : www.ap-swiss.ch

⁵⁶⁴ Le workshop d'inauguration d'AP-Swiss « Space applications and services: the next generation » (qui s'est déroulé à l'EPFL en février 2013) a mis l'accent sur les compétences de la région dans le « remote sensing », les microtechnologie, les télécommunications, la gestion de l'eau, et les cleantechs.

Programme du Workshop tenu à l'EPFL le 13.02.2013, Rolex Learning Center de l'EPFL : www.ap-swiss.ch/index.php?page=openingconference

temps, lorsque les technologies développées dans le simulateur d'ECA auraient atteint des TRL de niveau 5 ou 6. Les collaborations qui prendraient place au sein d'un simulateur d'ECA pourraient le positionner comme une vitrine du savoir-faire scientifique et technologique spatial « Swiss made ».

Avec les applications utiles à la société et très diversifiées qu'il cherche à développer, le programme Oïkosmos semble en cohérence avec la politique spatiale suisse actuelle⁵⁶⁵. La participation de la Suisse au développement, voire à l'hébergement d'un simulateur d'habitat clos tel que FIPES permettrait de renforcer la position compétitive d'activités spécifique de l'industrie suisse – et pas uniquement spatiale. Relevons enfin que l'intensification des activités suisses liées aux vols habités serait utile au développement d'une série de nouvelles niches technologiques liées aux systèmes clos, à la convergence des clusters technologiques de Suisse occidentale.

⁵⁶⁵ Lire à ce sujet l'interview du secrétaire d'Etat à la recherche, M. Mauro Dell'Ambrogio, chef de la délégation helvétique paru dans Le Temps du 17 novembre 2012 : www.letemps.ch/Page/Uuid/240b9352-302c-11e2-b7fd-42fb5ceb82b1/La_Suisse_prend_la_tête_du_domaine_spatial_européen

Selon lui, l'Europe spatiale doit premièrement « maintenir la quête de nouveaux savoirs », deuxièmement « s'assurer (...) des retombées technologiques » et enfin « trouver des utilisations inédites, simples et accessibles des systèmes spatiaux (de télécommunications, météo, etc.) ».

Voir également le Communiqué de presse du Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche du 21.11.2012 : <http://www.news.admin.ch/message/index.html?lang=fr&msg-id=46817>

22 Considérations finales

À ce stade, il ressort de l'analyse des parties du rapport que la réussite d'Oïkosmos dépendra en particulier de sa capacité à intéresser les meilleurs instituts terrestres dans les domaines nouvellement concernés, en sortant des milieux traditionnels du spatial. En élargissant l'accès à ses projets d'ALSS spatiaux à une plus large communauté de chercheurs, l'ESA pourra compter sur des scientifiques et ingénieurs très bien formés, en puisant dans le bassin des chercheurs issus de la R&D terrestre collaborant – ou ayant collaboré – aux activités du simulateur d'ECA. La maîtrise des systèmes clos requérant des connaissances spécifiques, cette démarche lui permettra d'autant plus de préserver sa capacité technique en la matière.

Cette quatrième partie a mis en évidence les avantages de la participation de la Suisse occidentale au développement d'un simulateur d'ECA, qui représente un moyen : de renforcer la participation institutionnelle suisse aux activités de l'ESA – ce qui paraît d'autant plus pertinent puisque l'ESA a parfois des difficultés à financer des projets spatiaux réalisés en Suisse ; de réunir sous un même un panel unique de technologies stratégiques pour la Suisse, au sein d'une plateforme intégrant l'interdisciplinarité en amont de son développement, dès les phases précoces de R&D ; de consolider les dynamiques existantes entre les promotions économiques, l'entrepreneuriat et de l'innovation ; et de conforter le positionnement de la région comme un centre d'excellence sur la carte européenne de l'éco-innovation.

Avec ces atouts présentés au §20.1, ces acteurs (§20.2) et les opportunités décrites au §21, la Suisse occidentale possède de nombreux arguments pour se positionner en tant que région-hôte d'un projet de simulateur d'ECA de manière crédible et pertinente, tant scientifiquement que techniquement, et à chaque niveau de la chaîne de valeur « Recherche-Innovation-Marché ». Avec son fort potentiel de transfert technologique, ce centre de recherche d'un nouveau genre est un projet fédérateur à la convergence des clusters technologiques de Suisse occidentale. Plus que l'installation elle-même, le programme de recherche synergistique sur les systèmes clos, et la dynamique scientifique potentielle associée, pourrait se révéler mutuellement bénéfique tant pour l'ESA que pour les acteurs de la région. Il ressort de cette analyse que l'écosystème de l'innovation de Suisse occidentale paraît idéal pour préparer une mission humaine vers Mars et mettre au point et industrialiser des applicatifs terrestres aux ECA.

En conclusion, et afin de contribuer activement à ces développements scientifiques et technologiques, il serait dès lors souhaitable que la Suisse occidentale développe une stratégie institutionnelle en faveur de sa participation au programme Oïkosmos et encourageant la mise en place de progressive d'un simulateur d'ECA dans la région. Avec les atouts et le contexte décrit ci-dessus, l'intérêt devrait être manifeste du côté de l'ESA.

PARTIE V : MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

Cette cinquième et dernière partie est consacrée à la description de mesures d'accompagnement qui contribueraient au rayonnement du programme Oïkosmos (§23), à l'établissement de recommandations et de suggestions à la Direction de l'Université de Lausanne (§24), ainsi qu'à l'exposition des conclusions générales de la présente étude Oïkosmos (§25).

PARTIE I. INTRODUCTION, MÉTHODOLOGIE ET CONTEXTE

§1 Constats et contexte spatial

§3 Méthodologie

§2 Intérêt de l'UNIL pour Oïkosmos

§4 Écosystèmes clos artificiels

PARTIE II. LE PROGRAMME OÏKOSMOS SYNERGIES DE RECHERCHE SUR LES ÉCOSYSTÈMES CLOS ARTIFICIELS

§5 Introduction méthodologique

§8 Biologie systémique

§6 Contexte terrestre

§9 Technologies de l'information et de la communication

§7 Écologie industrielle

§10 Habitat clos et durable

§11 Considérations finales (Horizon 2020, aspects éthiques, applications terrestres)

PARTIE III. LE SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL UNE PLATEFORME TECHNOLOGIQUE DE PREMIER PLAN POUR L'ÉTUDE DES SYSTÈMES CLOS

§12 Installation flexible et dynamique

§16 Plateforme intégrative et interdisciplinaire

§13 Forum Oïkosmos

§17 Pérennisation de la recherche sur les systèmes clos

§14 Centre de compétences Oïkosmos

§18 Sciences participatives et innovation ouverte

§15 Incubateur Oïkosmos

§19 Considérations finales

PARTIE IV. VERS UN SIMULATEUR D'ÉCOSYSTÈME CLOS ARTIFICIEL EN SUISSE OCCIDENTALE?

§20 Contexte de l'innovation en Suisse occidentale

§21 Opportunités offertes par un simulateur d'ECA

§22 Considérations finales

PARTIE V. MESURES D'ACCOMPAGNEMENT, RECOMMANDATIONS ET CONCLUSIONS

§23 Mesures d'accompagnement (politique et communication scientifique, aspects pédagogiques)

§24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'UNIL

§25 Conclusions générales

23 Les mesures d'accompagnement qui contribueraient au rayonnement du programme Oïkosmos

Ce chapitre propose des mesures d'accompagnement, à l'attention de l'ESA, qui contribueraient au rayonnement du programme Oïkosmos, à savoir l'élaboration d'une politique scientifique adaptée (§23.1), la planification adéquate de sa communication (§23.2) et l'exploitation de son potentiel pédagogique et didactique (§23.3).

23.1 L'élaboration d'une politique scientifique adaptée

Si l'ESA désire poursuivre l'encouragement de synergies de recherche sur les systèmes clos, tant du spatial vers le terrestre – mais aussi du terrestre vers le spatial, il paraît recommandé qu'elle développe et mette en œuvre des stratégies lui permettant d'obtenir le soutien nécessaire de la part des décideurs politiques afin de bénéficier d'un portage institutionnel fort du programme Oïkosmos : à tous les niveaux pertinents (européen, pays membres de l'ESA, régions, etc.), selon les parties prenantes en présence, selon les localisations futures possibles du démonstrateur, etc. ; et de garantir l'octroi de financements suffisants (qui ne va pas de soi en période de restrictions budgétaires en Europe). Sur la base de ces soutiens, l'élaboration d'une politique scientifique robuste permettrait au programme Oïkosmos et à son simulateur d'ECA de répondre à des questions spécifiques, et de suivre les traces de modèles d'excellence de collaboration scientifique internationale sur le long terme, matérialisée par des institutions comme le CERN. En outre, cette politique scientifique devrait aller au-delà du modèle du CERN dans certains de ces aspects, en veillant en particulier :

- à ce que l'agenda de recherche d'Oïkosmos ne soit pas aussi spécialisé (physique des particules) et laissant une part de créativité au simulateur d'ECA comme celui du programme Oïkosmos ;
- à encourager fortement le développement effectif des applications utiles pour l'économie et la société. L'atteinte d'un tel objectif pourrait être la mission du simulateur d'ECA, contrairement à une organisation comme le CERN dont ce n'a historiquement jamais été le mandat ;
- à intégrer prioritairement la problématique du développement durable ;
- à développer une stratégie digitale cohérente autour de la triade ECA-simulateur-activités de recherche (MELiSSA-FIPES-Oïkosmos) ;
- Créer et communiquer une base de données sur les avancées technologiques achevées par le projet ;
- à répondre aux besoins en Europe de déployer des projets innovants, ambitieux et intégrateurs dans les technologies émergentes, à l'image des initiatives de recherches d'envergure « Future and Emerging Technologies (FET) flagships projects » récemment attribuées (Gibney 2016), en témoigne l'intégration préliminaire des thématiques du management de l'habitat spatial, et dans

les ALSS à l'ambitieux programme-cadre de recherche Horizon 2020 (§23.3). Une mise en valeur d'Oïkosmos dans les prochains appels à propositions d'Horizon 2020 permettrait de souligner l'intérêt synergistique de la recherche sur les systèmes clos menée à l'ESA depuis tant d'années.

Toutes proportions gardées, un simulateur d'habitat clos pourrait ainsi se calquer sur les missions et les structures institutionnelles d'une installation de type « CERN ». Il s'agirait premièrement de clarifier quelle serait la stratégie institutionnelle exacte à adopter pour le projet Oïkosmos, et quelle serait l'organisation structurelle la plus adéquate à lui donner. Toutes deux devraient être mises au point pour matérialiser une ambitieuse plateforme de collaboration entre le porteur du projet (l'ESA dans le cas de FIPES) et des institutions partenaires (existantes et nouvelles), avec des parties prenantes issues du monde académique, économique, industriel, etc. En parallèle, il faudrait veiller à ce que cette politique scientifique mette en avant les aspects stratégiques démontrant la pertinence et l'intérêt du programme Oïkosmos et de son démonstrateur associé. Ces aspects stratégiques comprennent les capacités de ce tandem :

- à mettre à disposition un cadre pour un programme de recherche doté d'une vision holistique et d'ambitions d'envergures (préparation de la première mission Mars combinée avec la recherche visant à optimiser la durabilité de l'écosystème industriel du futur) (§4.2.3), en établissant un lien direct avec la recherche la durabilité terrestre (une des priorités affichées de l'Union européenne), conjointement avec la volonté de fournir des solutions pragmatiques pour affronter les problèmes environnementaux actuels (§6.1.3) ;
- à combiner une recherche scientifique fondamentale et un développement de hautes technologies avancées (Partie II) ;
- à maximiser les synergies interdisciplinaires et multidimensionnelles, de par la fédération et l'intégration de scientifiques de domaines variés (voir Partie II) ;
- à stimuler l'innovation technologique à tous les niveaux par l'intermédiaire des activités de la plateforme technologique (Partie III) ;
- à inspirer et potentiellement à intégrer de nombreuses parties prenantes (citoyens, politiques, médias, etc.) autour du projet (§13) ;
- à communiquer sur la thématique des systèmes clos auprès de cibles variées, non seulement de scientifiques et de politiques, mais aussi auprès du grand public (§23.2) ;
- à stimuler la relève et le rajeunissement du paysage scientifique européen (§23.3).

Pour toutes les raisons citées ci-dessus, le programme Oïkosmos pourrait être à même de recevoir un vaste soutien politique et social, à condition qu'une politique scientifique claire et solide soit élaborée

le plus amont possible et que les mesures appropriées soient prises en temps voulu, mais préalablement à la construction du simulateur. Le programme de recherche pourrait alors être mis en avant de manière adéquate auprès des différentes parties prenantes, et être actualisé au fur et à mesure des étapes de réalisation du projet.

23.2 La planification adéquate de sa communication

Les institutions scientifiques sont généralement en faveur de plus de communication, c'est-à-dire d'une communication active et plus soutenue de leurs activités de recherches. Toutefois, elle est rarement considérée avec toute l'attention nécessaire. Typiquement, la communication liée à de grands projets scientifiques est souvent faite après coup, lorsque tout a plus ou moins été décidé – voire déjà mis en œuvre –, et donc trop en aval pour pouvoir amener des feedbacks stratégiques pertinents pour la réalisation du projet. Cela comporte un risque d'un manque d'acceptation par la société de projets à grande échelle, par l'intermédiaire de canaux variés comme des protestations de citoyens, des contestations d'ONG, un manque de soutien des politiciens ou encore des critiques de la part des médias. À ce stade, les scientifiques et les décideurs commencent généralement à se plaindre du manque de compréhension du grand public (perçu comme « profane »), puis appellent à plus de communication. Généralement, ils désignent alors cette dernière « relations publiques ». Mais le mal est fait, la confiance est perdue, et (re)gagner le soutien du public peut prendre un temps très long (et coûter beaucoup d'argent!).

Quel que soit l'intérêt scientifique intrinsèque ou la validité effective d'un projet tel qu'Oïkosmos, il ne pourra voir le jour que s'il est discuté et planifié en dialogue avec l'ensemble des parties prenantes de la société, et pas uniquement entre des experts scientifiques et autres technocrates. De plus, cette communication ne doit pas être confondue avec des relations publiques contrôlées et ordonnées. N'oublions pas que les campagnes de communication liées à Oïkosmos, et bien entendu leur objet, la préparation de l'envoi de l'homme vers Mars malgré les conditions extrêmes et les risques que comportent ces missions, pourraient amener à débattre des aspects d'éthique que la vie en habitat clos soulève, aspects discutés au §11. Pour ces raisons, les enjeux de communication peuvent être considérés comme cruciaux (voire vitaux) pour fédérer les parties prenantes et faciliter la préparation d'une mission Mars et la construction du démonstrateur associé.

L'analyse de la communication autour du projet *Mars One* (brièvement introduit au §1.1.1) semble révélatrice de l'importance à accorder au message transmis dès les toutes les phases préparatoires d'un projet de missions humaines d'exploration planétaire. Même s'il ne s'agit pas d'un programme de recherche comme Oïkosmos ou d'une installation de recherche telle qu'un simulateur d'ECA, il n'en reste pas moins que l'objectif de cette initiative lancée en 2012 est semblable à celui des agences spatiales : envoyer l'Homme sur Mars. À la différence notable près que Mars One ne prévoit un envoi *sans retour* d'un premier équipage de quatre astronautes vers Mars en 2024⁵⁶⁶. La liste des membres du conseil consultatif scientifique et technique s'est étoffée et le projet bénéficie du soutien d'ambassadeurs

⁵⁶⁶ Voir le roadmap technologique de Mars One : www.mars-one.com/mission/roadmap (dernière consultation: 20.03.2014)

de renom⁵⁶⁷.

En 2015, le projet est toujours dans les premières phases de son développement, incluant notamment la recherche de partenaires industriels⁵⁶⁸, la sélection préliminaire des candidats aux missions⁵⁶⁹ et, bien entendu, la recherche de financement⁵⁷⁰. C'est précisément cette dernière stratégie de financement qui a fait l'objet d'une communication confuse lors de l'annonce initiale du projet. Une rumeur a rapidement circulé comme quoi la mission Mars One serait au cœur d'un show de télé-réalité quasi 24 heures sur 24, avec en particulier le suivi des membres de l'équipage sélectionnés durant les phases de préparation, mais aussi – et surtout – durant leur vol puis leur séjour martien *ad vitam æternam*⁵⁷¹. Un flou a régné quant au positionnement de Mars One : s'agissait-il d'un futur « Loft story » sophistiqué qui exploiterait médiatiquement la thématique des missions spatiales, plutôt que d'un grand projet technologique cherchant simplement à se financer en produisant un reportage télévisé pour partager au plus grand nombre la préparation des marsonautes⁵⁷². Un quiproquo aurait pu causer du tort, et même avoir un effet dévastateur sur la crédibilité du projet. Et ce d'autant plus que le projet soulève des enjeux éthiques évidents puisqu'il vise à envoyer l'homme sur Mars sans travailler sur les modalités de retour. Il faut reconnaître qu'aujourd'hui, avec le recul, on peut considérer qu'il lui a indirectement permis de se faire

⁵⁶⁷ Le comité scientifique compterait de nombreux professeurs d'universités, d'anciens hauts dirigeants d'agences spatiales, ainsi que le fondateur de la Mars Society, le Dr. Robert Zubrin. Lien vers le Mission Advisory Board de Mars One : www.mars-one.com/about-mars-one/advisers (dernière consultation: 20.12.2014). Parmi les ambassadeurs affichés figurent notamment un prix Nobel de physique (Prof. Dr. Gerard't Hooff), un astronaute (Dr. Sheikh Muszaphar Shukor) et... le créateur de Big Brother (Paul Römer).

Lien vers la liste des ambassadeurs de Mars One : www.mars-one.com/about-mars-one/ambassadors (dernière consultation: 20.03.2014)

⁵⁶⁸ Pour la conception et le développement des composants et du hardware nécessaires au développement des « rovers », de la navette, et la constitution d'une base opérationnelle, Mars One a annoncé en 2015 la signature de « lettres d'intérêt » avec des partenaires industriels tels que Lockheed Martin, Paragon, Space Exploration Technologies (Space X), ou Thales Alenia Space. Voir la liste complète des partenaires sur la page : www.mars-one.com/partners/suppliers (dernière consultation: 20.03.2014). Voir par exemple les communiqués de presse de Lockheed Martin et de Mars One du 10.12.2013 : <https://news.lockheedmartin.com/2013-12-10-Mars-One-Selects-Lockheed-Martin-To-Study-First-Private-Unmanned-Mission-To-Mars>; www.mars-one.com/news/press-releases/lockheed-martin-and-sstl-selected-for-mars-ones-first-unmanned-mission-to-m

⁵⁶⁹ À l'issue d'un appel à candidatures qui a remporté un vif succès, avec plus de 200'000 inscriptions, mille candidats (dont cinq Suisses) ont été sélectionnés par Mars One à ce stade. Voir la page Wikipédia : http://en.wikipedia.org/wiki/Mars_One (dernière consultation: 20.01.2015)

⁵⁷⁰ Par l'établissement de partenariats industriels exclusifs, le financement de sponsors, les revenus issus de l'exploitation de potentiels droits de propriété intellectuelle, l'implication d'individus fortunés, le crowdfunding et la vente de droits de retransmissions télévisuelles et autres reportages web sur la mission. Voir le modèle d'affaires de Mars One : www.mars-one.com/faq/finance-and-feasibility/what-is-the-mars-one-business-model (dernière consultation: 20.03.2014)

⁵⁷¹ Lire à ce sujet notamment les articles d'Anna Holligan sur BBC News Europe paru le 20.06.2012, « Can the Dutch do reality TV in space ? » : www.bbc.com/news/world-europe-18506033, de Hannah Devlin paru dans l'édition du 23.04.2014 du magazine The Times, « Big Brother on Mars with no way home if you are voted out » : www.thetimes.co.uk/tto/science/space/article3746157.ece, et de Victoria Jaggard paru le 23.04.2013 dans le magazine New Scientist, « “Big Brother” applicants wanted for one-way Mars trip » : www.newscientist.com/article/dn23423-big-brother-applicants-wanted-for-oneway-mars-trip.html#.Uyto6dzuFTc

⁵⁷² Bas Lansdorp, le fondateur et actuel CEO de Mars One, admet que « [c']est en partie de notre faute. La communication n'était pas assez claire et cela a permis que cette rumeur surgisse. Mais ce serait la chose la plus stupide qu'on puisse imaginer faire sur Mars... Il s'agira de montrer la préparation des candidats et leur travail sur place sur le mode du reportage. Pas question de téléviser leur vie privée. ». Lire l'article de Nic Ulmi paru dans Le Temps du 04.01.2014, « Notre vie sur Mars: de beaux lendemains ? » : www.letemps.ch/Page/Uuid/3ac03c8a-748f-11e3-b84d-86122f7a2c3b/Notre_vie_sur_Mars_de_beaux_lendemains

connaître à l'internationale par le « buzz médiatique » qu'il a généré. Avec l'engagement d'un responsable de la « comm' », la politique de communication a été revue, et la stratégie digitale semble à présent diversifiée et orientée web 2.0⁵⁷³. Le site web possède actuellement une foire à questions⁵⁷⁴ relativement bien ficelée qui touche de nombreux enjeux et aspects de la mission : coûts, modalités de financement, faisabilité technique, durabilité, éthique, gouvernance et structure sociale des colons, nocivité pour l'environnement martien, qualifications des candidats, risques encourus par l'équipage, etc. Avec cette « FAQ », Mars One propose dorénavant des réponses à toutes les interrogations – légitimes – que suscite et génère un projet d'une telle envergure. Si la liste des thèmes abordés semble assez complète, il est clair que les éléments publics restent superficiels. Ce manque d'information se justifie par le fait que nombre des technologies prévues semblent encore en phase préliminaire de développement, en témoigne les partenariats qui restent pour la plupart au niveau de lettre d'intérêt. Cela semble en particulier être le cas pour la stratégie de support-vie que la mission a adoptée⁵⁷⁵.

Ces incertitudes quant à la faisabilité technique n'empêchent pas Mars One de récolter des fonds, même s'ils sont limités à ce stade, leur feuille de route technologique étant assez étalée dans le temps permettant un développement progressif, pas à pas. Mais des donations à hauteur de 220'000 \$⁵⁷⁶ et une campagne à la « kickstarter » ramenant un peu plus de 300'000 \$⁵⁷⁷ en février 2014, on est encore bien loin des 6 milliards estimés pour financer le projet. Vu la longueur du projet et la nécessité de communiquer activement pour le financer, Mars One semble en quelque sorte condamné à investir des moyens conséquents dans sa communication et son « branding » pour pérenniser le soutien actuel d'un grand nombre d'individus. En d'autres termes, il s'agit d'éviter à tout prix que la communication du projet – et donc son financement – ne s'essouffle, comme le démontrent les assertions de son CEO :

⁵⁷³ Mars One a par exemple récemment développé une plateforme communautaire qui remporte un certain succès. Une fois inscrit, les supporters peuvent 1) bénéficier de droits de vote pour les futures décisions relatives à la mission, 2) partager leurs suggestions quant aux activités en cours, et 3) être récompensés de leur soutien par promotion sur des points et autres badges, en fonction de leurs donations. Site web de la communauté Mars One : <https://community.mars-one.com> (dernière consultation: 20.03.2014).

⁵⁷⁴ FAQ de Mars One : www.mars-one.com/faq (dernière consultation: 20.03.2014)

⁵⁷⁵ L'approvisionnement en eau serait basé sur son extraction à partir du sol martien, après sélection du site d'implantation par des « rovers » et la pose d'un système d'extraction, préalablement à l'arrivée des humains. Il est prévu que ces derniers disposent d'une cinquantaine de litres d'eau par jour. L'eau serait d'ailleurs la source d'oxygène. L'azote gazeux serait quant à lui extrait directement de l'atmosphère martienne. La nourriture serait produite par des systèmes hydroponiques basés sur l'agriculture 3D éclairés par des LED, comme ceux développés par la compagnie hollandaise PlantLab (www.plantlab.com). Au total, il est prévu que 50 m² seront dédiées à la culture de végétaux comestibles pour chaque membre de l'équipage. Enfin, une épaisse couche de sol martien sera déposée au-dessus de l'habitat gonflable pour protéger la serre et les astronautes des radiations. Résumé du système de support-vie prévu par Mars One : www.mars-one.com/faq/health-and-ethics/will-the-astronauts-have-enough-water-food-and-oxygen

⁵⁷⁶ Voir les modalités de donations : www.mars-one.com/donate (dernière consultation: 20.03.2014)

⁵⁷⁷ La campagne de financement participatif a récompensé les généreux donateurs avec des produits de merchandising tels que des T-shirts, des autocollants et des pièces de monnaie à l'effigie de la mission, promettant également selon les montants d'avoir leur nom gravé au laser sur les parois de la future base martienne, d'envoyer sur Mars une photo de leur portrait imprimé accompagné au dos d'un message de la longueur d'un SMS, ou encore de pouvoir participer à la cérémonie le jour du lancement des premiers véhicules. Voir la description du projet sur le site de crowdfunding indiegogo : www.indiegogo.com/projects/mars-one-first-private-mars-mission-in-2018 (dernière consultation: 20.03.2014)

« Rien ne peut arrêter une idée dont le temps est venu »⁵⁷⁸. En tous les cas, Mars One prend le risque de s'attirer des critiques, partant du principe que s'il devait être mené à bien, il permettrait des réalisations historiques (premières missions spatiales robotique et humaine privées, premier homme sur Mars, etc.), plus de cinquante ans après le premier pied sur Lune. Si le projet a le mérite de créer un élan ou de maintenir un intérêt pour les missions spatiales humaines, alors que les agences spatiales comme la NASA ont plutôt tendance à les délaisser au vu de leur coût et des risques associés, la stratégie de communication au lancement du projet ne semble pas avoir été à la hauteur, en particulier avec une feuille de route brouillonne pour la réalisation et le financement effectifs de la mission.

Contrairement à Mars One, SpaceX s'est d'abord concentré sur le développement technologique de ses capsules spatiales plutôt que sur sa politique de communication. Avec l'amarrage de son cargo spatial à l'ISS en 2012⁵⁷⁹, moins de dix ans après sa création, n'a pas eu besoin de forcer sa communication pour attirer l'attention du monde entier. Le succès fulgurant de SpaceX indique qu'un financement privé permet d'accélérer le déploiement de projets spatiaux, grâce à une réduction significative des coûts des missions interplanétaires (Pellerin et al. 2013).

Basé majoritairement sur un financement public, le développement d'un simulateur d'ECA comme FIPES impliquera quant à lui un tout autre écosystème de parties prenantes, et corollairement un concept et une stratégie de communication passablement distincte. En outre, de par les problématiques terrestres et pragmatiques qu'il traite, le programme Oïkosmos représente un puissant vecteur de communication et de vulgarisation scientifique des activités d'exploration spatiale habitée à un large public, et en particulier auprès des citoyens européens. Au niveau institutionnel, il est également stratégique de convaincre les pays membres de l'ESA et le management de l'ESA de l'adéquation du programme scientifique et de ces résultats attendus avec les objectifs de l'agence. L'enjeu n'est rien d'autre que de s'assurer le soutien à long terme de la démarche par les parties prenantes clés. Afin de s'assurer que des problèmes de communication évitables (voir inutiles) ne puissent pénaliser le projet Oïkosmos, il est suggéré ici :

♦ de développer d'un concept de communication (charte de communication) visant à : clarifier la vision et les objectifs du programme Oïkosmos (description de ce que fait l'ESA, pourquoi elle le fait, de l'intérêt de le faire, etc.), ses aspects innovants, leurs liens avec les problématiques de développement durable, et les bénéfices potentiels et attendus pour la société et l'économie (écotechnologies, etc.) ; et formuler explicitement les arguments pour chacune des parties prenantes du projet et définir précisément ce qui doit être communiqué et pour quelles raisons.

⁵⁷⁸ Lire l'article de Nic Ulmi paru dans Le Temps du 04.01.2014, « Notre vie sur Mars: de beaux lendemains ? » : www.letemps.ch/Page/Uuid/3ac03c8a-748f-11e3-b84d-86122f7a2c3b/Notre_vie_sur_Mars_de_beaux_lendemains

⁵⁷⁹ Voir l'article publié le 25.05.2012 dans le NY Times, « First Private Craft Docks With Space Station » : www.telegraph.co.uk/science/space/9290672/SpaceX-Dragon-capsule-docks-with-International-Space-Station.html

◇ d'élaborer une stratégie de communication, à l'interne comme à l'externe, basée sur ce concept (et non l'opposé comme c'est souvent le cas, car ici le contenu du message doit être plus important que la stratégie).

◇ d'impliquer des experts en communication le plus tôt possible dans le processus, afin qu'ils puissent comprendre et s'approprier le projet et aider à élaborer l'argumentaire pour chacun des aspects du programme Oïkosmos.

◇ de mobiliser des chercheurs en communication (sociologistes, experts des médias, expert des réseaux sociaux, etc.) qui pourront considérer le programme Oïkosmos et son projet de simulateur d'ECA comme une étude de cas en soi, et qui pourront documenter et investiguer les façons avec lesquels un tel projet peut être communiqué de manière appropriée, en dialoguant avec l'ensemble des parties prenantes de la société. Ceci pourrait faire partie intégrante de l'agenda de recherche du projet et permettre d'impliquer une communauté scientifique de plus.

◇ de créer au plus vite une plateforme de communication et d'information web. Durant ces vingt-cinq années d'existence, le projet MELISSA a été régulièrement valorisé dans de nombreux médias européens (presses, magazines, sites Internet, radio, télévision). Des conférences grand public sont fréquemment données par les experts du consortium. De nombreux articles scientifiques sont publiés chaque année, dont une partie a servi de référence pour l'établissement du présent travail. Toutefois, la communication en ligne sur le projet n'est pas optimale, et parfois obsolète, incomplète ou inadaptée au grand public. Il est recommandé de (re)structurer l'information déjà à disposition sur le web relative à Oïkosmos, et en particulier : de mettre à jour en profondeur les sites web officiels traitant des ECA, notamment celui de MELISSA ; d'ajouter des volets supplémentaires, mettant en avant la pertinence et l'intérêt du programme de recherche Oïkosmos et du démonstrateur technologique au sol dédié aux campagnes de simulation terrestres ; de créer un portail Internet pour les aspects proposant des informations adaptées pour chaque groupe cible (en priorité pour le grand public, mais aussi pour les chercheurs, les industriels, les investisseurs) et caractérisé par un contenu limité, visuel, ludique, convivial, didactique, etc. Il s'agit avant tout de privilégier la qualité des supports d'information mise à disposition à chacun des groupes cibles de communication, plutôt que leur quantité ; de créer des communautés sur les réseaux sociaux tels que LinkedIn, Twitter et Facebook (voir p. ex. Haider & Groemer 2014) ; de proposer une Newsletter trimestrielle pour toutes personnes souhaitant rester informées des développements futurs du projet.

◇ de développer un concept de communication permettant de suivre les activités d'un équipage préparant les missions Mars, non pas dans la perspective d'un télé-crochet scientifique d'un nouveau genre, mais dans la perspective d'un reportage scientifique permettant de voir et de suivre en temps réel comment des individus vivent en système clos, en démontrant qu'il est possible de respirer l'air, de se nourrir de produits alimentaires, de boire de l'eau en provenance de ses propres déchets.

✧ d'effectuer une enquête auprès de la population européenne pour récolter l'opinion de l'utilisation de telles technologies, en particulier s'il s'agit de consommer des produits alimentaires issus directement du recyclage de déchets organiques humains. Autre exemple, si des organismes génétiquement modifiés sont utilisés dans l'ECA, des conditions maîtrisées de culture en habitat clos pourraient influencer positivement la perception du public. En l'occurrence, les modalités de production confinée au site de fabrication pourraient rassurer les personnes interrogées sur les risques de dissémination des souches microbiennes ou des graines de plantes ayant fait l'objet de manipulation de bio-ingénierie. Dans un tel contexte, une importance particulière devrait ainsi être portée à afficher clairement les avantages, mais aussi les inconvénients et les risques de l'utilisation des outils de la biologie synthétique en fournissant des informations de manière transparente, compréhensibles, exactes, actualisées, accessibles et cohérentes.

Une communication adéquate de la démarche sera d'autant plus importante qu'elle conditionnera tant la crédibilité scientifique que l'acceptabilité auprès des futurs utilisateurs des applications qui pourraient jaillir des développements technologiques autour du simulateur d'ECA. Rappelons enfin que d'autres aspects de la communication ont été discutés au §13 sur le Forum Oïkosmos.

Lors de l'élaboration de ce rapport, les entretiens menés avec les groupes de recherches de la région (listés à l'Annexe XX) ont permis de récolter les arguments rendant les personnes rencontrées plutôt favorables ou opposées à une collaboration à terme dans le cadre du projet Oïkosmos, tant la participation à ses activités de recherche (Partie II), qu'à celles propres à la plateforme technologique (Partie III). Il conviendrait de tenir compte de ce type de commentaires lors de l'établissement de la communication autour du projet.

✧ Sélection de composantes du projet rendant les chercheurs rencontrés favorables à une participation à Oïkosmos (synergie de recherche et transfert de technologie) :

- le côté visionnaire du projet et la pertinence des objectifs du programme Oïkosmos ;
- la possibilité de prendre part à des synergies de recherche terrestre et spatiale ;
- la possibilité de travailler en systèmes clos à une échelle de complexité « méso », à la frontière des connaissances actuelles de l'écologie scientifique et industrielle ;
- la combinaison unique de l'écologie, du biomédical, de la microtechnique, ainsi que celle du recyclage de déchets organiques et de la production alimentaire dans une perspective de durabilité terrestre ;
- la convergence de ces thématiques vers un objectif commun ;
- la volonté de la Direction de l'UNIL à explorer la recherche sur la thématique des missions habitées d'exploration interplanétaire dans une perspective de durabilité terrestre ;
- l'articulation possible de thématiques de recherche variées, souvent émergentes ou en plein essor, grâce à une approche systémique « non traditionnelle » ;

- l'approche collaborative et la forte composante interdisciplinaire du projet ;
- le fait de pouvoir envisager d'entamer des collaborations interfacultaires ou interinstitutionnelles qui ne verraient pas forcément le jour autrement, par exemple des collaborations entre le Swiss Space Center et les Facultés des Sciences de la vie ou ENAC à l'EPFL ;
- la participation possible à un consortium de recherche pour un projet européen d'ampleur ;
- la compatibilité des synergies de recherche en lien avec des programmes européens comme Horizon 2020, et précédemment avec le FP7 ;
- le potentiel en termes de reconnaissance pour les chercheurs et professeurs y participant ;
- le fait que le projet fasse rêver tant les étudiants que les chercheurs ;
- les atouts pédagogiques du projet ;
- le potentiel en termes de communication scientifique, tant auprès du grand public, que des décideurs et des industriels, etc. ;
- la connexion potentielle avec un transfert de technologie ;
- la relative urgence d'aborder la circulation des éléments et des molécules organiques dans les systèmes vivants avec des instruments et des installations d'ampleur, afin de mieux maîtriser la diffusion des molécules et des substances produites par l'homme dans l'environnement ;
- le renforcement des interactions entre acteurs du spatial et chercheurs académiques (du non spatial) de Suisse occidentale ;
- la possibilité de réunir les parties prenantes de l'écosystème de l'innovation de Suisse occidentale autour d'une thématique commune (systèmes clos) ;
- le transfert de technologie d'applicatifs permettant de répondre aux enjeux environnementaux et de santé actuels ;
- l'accès à une plateforme technologique unique en son genre (analogue spatial et simulateur de systèmes clos, etc.) ;
- les modalités de fonctionnements possibles du simulateur d'ECA (ouvert, flexible, collaboratif, intégratif, etc.) ;
- le modèle économique du centre de compétences tel que proposé ;
- la pertinence de l'installation au sol pour combler le relatif manque de plateforme pour effectuer de nos jours des recherches sur de longues durées.

✧ Sélection de composantes du projet rendant les chercheurs rencontrés favorables à une participation à Oïkosmos (synergie de recherche et transfert de technologie) :

- le manque de disponibilité des chercheurs, qui ont déjà fort à faire avec leurs recherches en cours ;

- les investissements en temps conséquents nécessaires au développement et l'entretien des collaborations institutionnelles dès les phases préliminaires, sans garantie que le projet puisse voir le jour en Suisse occidentale ;
- la difficulté perçue de convaincre les milieux traditionnels du spatial à sortir de leurs domaines habituels et aborder la durabilité terrestre ;
- la multidisciplinarité et le côté systémique, perçus parfois comme non pertinents, alors qu'il paraît plus judicieux de se concentrer plutôt sur certains sous-systèmes (recyclage de l'eau) ;
- la crainte que le coût des expérimentations soit prohibitif ;
- les potentielles difficultés à faire collaborer des ingénieurs et des biologistes, liées à la composante fortement interdisciplinaire du projet
- une incompatibilité avec leurs méthodologies et protocoles opératoires de recherche : des chercheurs en sciences biomédicales déplorent le faible nombre d'individus évoluant en parallèle dans l'ECA, car il est insuffisant pour des extrapolations statistiques (thèmes concernés : physiologie humaine, sciences omiques, alimentation fonctionnelle, etc.) ; des chercheurs en biotechnologie environnementale reprochent que le système soit basé sur des cultures pures, au vu des risques de prolifération de phages. L'axénie des compartiments ne correspondant d'ailleurs pas suffisamment, selon eux, à la réalité des colonies de micro-organismes des écosystèmes naturels ; des chercheurs en écologie scientifique estiment que la biodiversité d'ECA tels que MELiSSA était trop faible pour apporter une réelle valeur écosystémique.
- la pertinence intrinsèque de développer des systèmes de support-vie biologiques complexes pour ce type de missions : des chercheurs ne trouvent par nécessaire de produire de la nourriture à partir de déchets organiques et favorisaient plutôt une nourriture lyophilisée et l'administration de compléments alimentaires et des comprimés vitaminés, en se concentrant sur un recyclage physico-chimique de l'eau ;
- la pertinence intrinsèque du programme Oïkosmos : des chercheurs estiment qu'il y a déjà bien assez de problèmes environnementaux à traiter sur Terre, sans qu'il soit nécessaire de projeter d'aller sur Mars en justifiant la mission par des retombées terrestres supposées.

Malgré ces oppositions et réserves, soulignons que le programme Oïkosmos a généralement été bien perçu par les chercheurs de la communauté scientifique de Suisse occidentale. Tant leur appréciation positive que leur intérêt à y participer étaient réels pour la plupart d'entre eux, même si un déploiement du programme Oïkosmos dans un simulateur d'ECA restait à ce stade loin d'être effectif à ce stade, qui plus est sur sol suisse.

En cas de poursuite de la réflexion sur le potentiel, l'intérêt et la pertinence d'une telle plateforme scientifique et technologique en Suisse (occidentale) pour les acteurs de la chaîne de valeur Recherche-

Innovation-Marché (dont la stratégie institutionnelle est discutée au §21), il sera décisif de communiquer une politique scientifique d'Oikosmos adaptée (§23.1) auprès des parties prenantes identifiées, afin de s'assurer l'acceptabilité, du soutien et la participation du plus grand nombre d'entre elles au projet.

23.3 L'exploitation de son potentiel pour l'éducation à la science

L'espace fascine l'homme depuis toujours et continuera le faire. À n'en pas douter, décrire les implications possibles de nos universités et écoles d'ingénieurs dans la préparation de missions spatiales habitées permet de susciter des vocations scientifiques chez les jeunes. Un des moyens employés par les agences consiste précisément à s'investir activement dans des projets d'éducation et de sensibilisation, non seulement au niveau de la formation, mais à tous les niveaux d'éducation, en proposant des informations ciblées aux citoyens européens. Ces démarches visent à faire prendre conscience à quel point les bénéfices du spatial sont ubiquitaires dans leur quotidien. L'étude des ECA est un projet captivant pour les jeunes générations. Avec une communication adaptée, la popularité du programme Oïkosmos pourrait se rapprocher de celles d'autres projets spatiaux européens ou américains, et encourager la relève dans les filières techniques, en inspirant les prochaines générations de scientifiques, de mathématiciens ou d'ingénieurs. Le programme servirait alors, à son échelle, de frein à la pénurie d'ingénieurs dans certaines régions d'Europe, mais également en Suisse.

Afin d'exploiter pleinement le potentiel pédagogique du programme Oïkosmos pour l'éducation à la science, il semble recommander d'effectuer les activités didactiques à plusieurs niveaux de formations :

✧ À l'école obligatoire et au lycée / gymnase : sensibiliser les jeunes européens aux enjeux et objectifs des missions humaines vers Mars, et à leurs retombées potentielles en termes de durabilité terrestre, par exemple en proposant par exemple : des outils éducatifs permettant de modéliser et simuler le fonctionnement de l'ECA (Arai et al. 2008) ; des expériences, à l'image du kit « Food from Spirulina » à l'attention des professeurs de sciences qui a été distribué en 2015 à des centaines de classes à travers l'Europe⁵⁸⁰. D'autant plus motivant que certains des élèves ont pu participer à une série de connexions en direct avec l'ISS (retransmises en streaming sur Internet) pour discuter des travaux pratiques avec l'astronaute Samantha Cristoforetti en avril 2015, et apprécier également les échanges de cette dernière avec les scientifiques de MELiSSA⁵⁸¹ ; un laboratoire de biologie pour les écoles basé dans le simulateur d'ECA (à l'image du Laboratoire public « L'Éprouvette » à l'UNIL⁵⁸²), proposant un matériel adapté permettant de réaliser des ateliers ludiques stimulant la curiosité envers la Biosphère en démontrant le

⁵⁸⁰ « Food from Spirulina » proposait aux élèves une approche nouvelle et intéressante d'étudier la photosynthèse. Grâce à la lumière, les élèves peuvent cultiver la spiruline et observer les cultures devenir de plus en plus denses au fur et à mesure de la croissance de la cyanobactérie. À l'aide d'un milieu de culture contrôlé, la nécessité du carbone est clairement démontrée et l'intensité de la photosynthèse est quantifiée en collectant l'oxygène produit. Le fait de lier ce travail à la problématique des vols spatiaux habités en produisant de la nourriture et de l'oxygène, ne peut que motiver les élèves dans leur travail et les pousser à une réflexion plus poussée. Page web de l'ESA décrivant l'expérience en question :

www.esa.int/Education/Teachers_Corner/Food_From_Spirulina_experiment_underway (dernière consultation le 01.06.2015).

Voir également l'article paru le 23.06.2015 dans Ouest France: www.ouest-france.fr/colleges-bayeux-une-experience-avec-lagence-spatiale-europeenne-3251166 (dernière consultation le 01.06.2015).

⁵⁸¹ « Samantha Cristoforetti interviews Melissa scientists from space », vidéo de l'ESA postée sur YouTube le 01.05.2015 : <https://www.youtube.com/watch?v=yv60pm6QdU>

⁵⁸² Site web de L'Éprouvette : www.unil.ch/interface/page18617.html

fonctionnement, la pertinence et les opportunités d'un système clos miniaturisé et bioinspiré, permettant de piloter les conditions environnementales et d'observer l'effet d'instabilités sur des écosystèmes ou démontrant les limites de son artificialisation. Ces activités pourraient se dérouler en collaboration avec des organisations internationales telles que des ONG environnementales, l'UNESCO, ou d'autres agences de l'ONU liées à la coopération et au développement, comme celles basées en Suisse occidentale.

✧ Dans les milieux académiques : organiser des formations pratiques en immersion dans une infrastructure orientée système clos ; créer une école doctorale Oïkosmos permettant de profiler des doctorants européens pour des carrières scientifiques ou en industrie permettant d'exploiter leurs compétences dans le domaine des systèmes clos ; mettre à disposition de bourses Oïkosmos pour des thèses de doctorat ou des chercheurs avancés (post-doctorants, etc.), à l'image de ce que développe la Fondation MELiSSA (voir §13), mais avec une forte composante synergistique ; développer de nouveaux programmes éducatifs dans les filières appropriées des universités et des écoles d'ingénieurs tirant parti du potentiel synergistique de l'exploration spatiale.

Par exemple, il conviendrait à terme d'intégrer la problématique des écosystèmes et des habitats clos dans les filières universitaires traitant des cleantechs et plus généralement de durabilité terrestre. En Suisse, c'est déjà le cas dans plusieurs cursus universitaires à l'UNIL et à l'EPFL, cela pourrait être généralisé aux Universités appliquées. À ce propos, l'Unité d'enseignement ENAC (UEE) « Habiter Mars » conduite à l'EPFL depuis 2012 est un exemple concret de démarche liées aux habitats clos visant à offrir une valeur ajoutée pédagogique et interdisciplinaire aux étudiants. Ce projet semestriel réunit un après-midi par semaine des étudiants de dernière année de Bachelor issus des trois sections de la Faculté ENAC (architecture, génie civil et génie rural). L'enseignement de l'UEE Habiter Mars, dans lequel le groupe Ecologie industrielle a été fortement impliqué, s'est organisé autour d'un travail pratique qui consiste à développer en groupe une proposition pour une base martienne. Le déroulement se fait en deux phases (voir l'Annexe XX pour le descriptif complet de la formation). La première phase vise à analyser le contexte martien. Des groupes d'étudiants élaborent des stratégies d'implantation (site d'implantation : position géographique, en surface ou souterrain), matérielles (quelles ressources matérielles offrent quelles possibilités constructives), structurelles (relation espace, structure, matériaux), d'enveloppe (opaque, transparente, matériaux), d'approvisionnement en oxygène, eau et nourriture (besoins vitaux), de production et de stockage et transformation d'énergie, et d'organisation spatiale pour les diverses activités humaines. Les participants de chacun de ces groupes deviennent donc des « spécialistes » d'un thème donné (besoins vitaux, structure et enveloppe, système constructif, gestion de l'énergie, vivre sur Mars, etc.). Durant une seconde phase, de nouvelles équipes sont formées avec un spécialiste issu des groupes de l'étape précédente. Il s'agit alors de réunir et d'adapter les diverses stratégies élaborées pour en faire un projet cohérent de station martienne. D'une part, ceci nécessite de l'étude de systèmes constructifs qui sont en mesure d'assurer les performances requises tels

que sécurité structurale, isolation thermique, renouvellement d'air, lumière naturelle, etc. pour assurer la sécurité et les conditions climatiques requises à l'intérieur de la base. D'autre part, les divers éléments indispensables à la création d'un écosystème clos à même d'offrir une « Biosphère » viable et à la mise en place d'un cadre de vie suffisamment confortable pour les colons sont déterminés et organisés tant au niveau fonctionnel que spatial. Un encadrement « à la table » de chacun des groupes permet de contrôler et vérifier sommairement la faisabilité technique des propositions chaque semaine. Cet exercice pratique est bien entendu complété par des interventions théoriques, des présentations ainsi que des séminaires tout au long du semestre. Au cours des premières éditions de cette UEE, suivie au total par près de deux cents étudiants, la problématique des habitats soumis aux fortes contraintes de l'environnement martien a pu être pleinement intégrée à la formation des étudiants, leur permettant de s'initier à la complexité d'une démarche de projet devant incorporer une multitude d'aspects parfois contradictoires. L'exercice était pour la plupart d'entre eux, leur première mise en pratique de l'interdisciplinarité, tout comme de leur première réelle collaboration avec leurs collègues des autres filières de formation de la Faculté ENAC. Dans ce cadre, les compétences de chacun ont pu être directement utiles aux autres, ce qui a permis leur intégration effective à un projet commun. La démarche pédagogique a fait l'objet d'une publication d'un article dans le cadre des proceedings de l'International Conference Structures and Architecture 2013 (Nussbaumer et al. 2013) (Annexe XX).

Afin d'améliorer les projets d'éducation et de sensibilisation, il pourrait s'avérer intéressant :

- ✧ d'organiser un challenge ou un concours auprès des étudiants européens ou un forum d'idée Oïkosmos auprès des chercheurs terrestres récompensant les meilleures propositions. Les lauréats auraient la possibilité, par exemple de réaliser son expérience au sein du simulateur, de vivre quelques jours dans l'habitat, de recevoir des équipements dédiés par des astronautes, etc.
- ✧ de proposer des activités, des visites, des camps simulant une mission, à l'image du projet « Mission X, entraînez-vous comme un astronaute ». Cette initiative éducative internationale a pour objectif de promouvoir l'exercice et une alimentation saine chez les jeunes en les encourageant à « s'entraîner comme un astronaute »⁵⁸³. En imitant la vie des astronautes en mission, de tels programmes permettent : de sensibiliser les nouvelles générations au domaine du spatial, d'encourager une alimentation saine, d'encourager l'exercice, etc., Oïkosmos s'inscrivant parfaitement dans cette perspective. Il serait judicieux d'inclure un module scientifique lié aux ECA. Par exemple, une activité « du déchet à l'assiette » porterait par exemple sur la valorisation des déchets, la vie et la production de nourriture en système clos, la gestion parcimonieuse des ressources, etc. Autre exemple, la NASA propose un

⁵⁸³ Établi dans une dizaine de pays par 14 agences (dont la Suisse), ce programme a proposé en 2011, 18 activités en 7 langues et ont ciblés 130 équipes totalisant 4'000 enfants, adolescents et jeunes. Les activités se focalisent sur l'exercice physique et la nutrition, avec des modules comme : 1) Retour à la Station de base, 2) Entraînement de la force physique de l'équipage, 3) Promenade dans l'espace, 4) Contrôle de la mission, 5) Décroche la Lune en sautant, 6) Explorations et découvertes, 7) Bâtis-toi un tronç d'astronaute, 8) Assemblage de l'équipage, 9) À l'assaut d'une montagne martienne, etc. Site web de « Mission X, s'entraîner comme un astronaute » : <http://trainlikean astronaut.org/fr/about>

« eXploration Habitat (X-Hab) Academic Innovation Challenge »⁵⁸⁴ vise à impliquer les étudiants d'universités américaines en sponsorisant le développement de concepts innovants qui pourraient être appliqués aux habitats d'exploration. On y retrouve notamment des thèmes comme l'impression 3D, la téléprésence, la télémédecine, la production de plantes avec assistance robotique, etc. Un tel « challenge » pourrait être proposé par l'ESA sur la thématique de l'habitat clos.

✧ de positionner le simulateur d'ECA comme un site touristique d'intérêt, notamment de par son potentiel éducatif pour des publics cibles variés, à savoir les écoles primaires (aspects pédagogiques liés au développement durable), les adolescents (incitation à suivre des filières techniques d'étude (gymnase, lycée, apprentissage), les étudiants d'écoles d'ingénieurs, d'universités, etc. (visites, stages, sujets de mémoire), et les familles (miniaturisation d'écosystèmes, technologies de dernier cri de valorisation des déchets et de production de nourriture, observation, voire interaction avec les personnes évoluant en systèmes clos). Les projets touristiques associés proposeraient une nouvelle forme d'attractions allant jusqu'à intégrer des solutions écotecnologiques innovantes et concrètes à leurs infrastructures, à l'image du « projet Eden »⁵⁸⁵, du « Biodôme de Montréal », ou de Biosphère 2, mais avec des conditions de confinement plus poussées permettant de présenter de nouvelles habitudes culturelles ou alimentaires.

✧ de développer le merchandising ciblé avec une gamme de produits et de souvenirs MELiSSA comme un kit d'ECA, version améliorée et commercialisable dans la lignée de l'activité « Food from Spirulina » mentionnée ci-dessus (voir également Annexe XX). En effet, l'engouement pour les kits d'exploration spatiale do-it-yourself étant aujourd'hui des plus manifestes⁵⁸⁶. Dans le cas de MELiSSA, on pourrait imaginer des « colonnes de Winogradsky 2.0 »⁵⁸⁷ permettant de sceller un mini-écosystème microbien qui pourra évoluer en système clos de manière quasi définitive, et dont tant la récolte du matériel que l'assemblage doivent être faciles, didactiques, abordables. Il pourrait s'agir d'aquarium de petite taille doté d'un design moderne permettant d'observer le contenu.

✧ d'intégrer un musée interactif à l'environnement autour du simulateur d'ECA proposant des expositions interactives décrivant les grands moments de l'exploration spatiale d'astronautes de l'ESA, des tours virtuels liés au simulateur, des jeux interactifs, des magasins et des boutiques pour le merchandising liés à MELiSSA.

✧ de co-développer des jeux vidéos pédagogiques basés sur les missions d'exploration habitées, à

⁵⁸⁴ Site web de « X-Hab » : www.nasa.gov/exploration/analogs/xhab_challenge.html

⁵⁸⁵ Site web de l'Eden Project, un complexe environnemental sur les thème de la nature et du développement durable : www.edenproject.com/whats-it-all-about

⁵⁸⁶ Par exemple, un kit permettant de filmer l'ascension vers l'espace avec une simple caméra de type GoPro attachée à un ballon gonflé d'hélium, ainsi qu'à un parachute et un GPS (pour récupérer éventuellement le matériel après le « voyage »). Voir par exemple le film Space Balloon du Brooklyn Space Program : http://brooklynspaceprogram.org/BSP/Space_Balloon.html

⁵⁸⁷ Page Wikipédia dédiée à la colonne de Winogradsky : http://fr.wikipedia.org/wiki/Colonne_de_Winogradsky

l'image de celui créé par la NASA simulant l'atterrissage de Mars Curiosity⁵⁸⁸ ou des « jeux sérieux⁵⁸⁹ » (ou « serious game ») en surfant sur la vague des jeux mobiles et/ou en utilisant des technologies de reconnaissance de mouvement comme Kinect de Microsoft ;

✧ d'élaborer des supports multimédias (des jeux, des vidéos, des questionnaires sur MELISSA, etc.) permettant de faire passer un message adapté pour les groupes cibles.

⁵⁸⁸ « NASA Unveils 'Mars Rover Landing' Game for Xbox Kinect », Youtube, consulté le 13.08.2012 : www.sbf.admin.ch/htm/themen/weltraum_fr.html, jeu téléchargeable sur la plateforme Xbox live marketplace.xbox.com/fr-FR/Product/Mars-Rover-Landing/66acd000-77fe-1000-9115-d80258480836

⁵⁸⁹ Page Wikipédia dédiée aux « jeux sérieux » : fr.wikipedia.org/wiki/Jeu_sérieux

24 Recommandations et suggestions à la Direction de l'Université de Lausanne

À la lumière des éléments présentés jusqu'ici, les auteurs ont recommandé en 2014 à la Direction de l'UNIL de poursuivre la valorisation du projet au niveau académique et de renforcer la collaboration en cours entre l'UNIL et l'ESA en rejoignant formellement le Consortium MELiSSA.

En parallèle, il est prévu que l'UNIL organise un séminaire de synthèse sur les systèmes clos à l'horizon mi-2016, en parallèle avec la tenue du MELiSSA yearly meeting bisannuel. Cet événement d'une durée d'un à deux jours permettra de valoriser le travail accompli à l'UNIL ces dernières années et pourrait servir d'enclencher et de disséminer une dynamique autour du domaine des écosystèmes et des habitats clos dans la région. Un tel colloque s'inscrirait dans la foulée de l'intégration de l'UNIL au Consortium MELiSSA dès janvier 2015 et dans la lignée de la série de manifestations prévues par l'ESA dès la fin 2014 pour fêter les vingt-cinq ans du projet MELiSSA. Cette conférence axée sur la problématique des écosystèmes et des habitats clos pourrait se dérouler en trois parties : la première s'adressant principalement à un public académique et industriel, la seconde ouverte au grand public, la troisième réunissant toutes les parties prenantes du projet intéressées à collaborer sur les applications terrestres des missions habitées de longue durée, aussi bien dans le cadre de synergies des recherches, que dans le transfert technologique associé. Il s'agirait ainsi, outre l'intérêt purement scientifique, de formaliser un « noyau » de personnes intéressées à démarrer des collaborations ponctuelles ou à participer à l'élaboration d'une stratégie institutionnelle visant à développer les activités liées à l'étude des systèmes clos en Suisse occidentale (voir §21, et Tableau 4 en fin de section).

L'événement devrait permettre à l'UNIL d'être clairement identifiée à l'avenir comme acteur de la recherche du domaine spatial suisse, même si celles-ci restent relativement réduites à ce stade, en comparaison de l'UNIGE, de l'EPFL ou du CSEM.

Ce rapport dresse un panorama des multiples synergies de recherches possibles avec des chercheurs de l'UNIL dans le cadre d'Oïkosmos, allant bien au-delà des activités du groupe Écologie Industrielle de la FGSE. Relevons que le présent rapport Oïkosmos et une thèse abordant largement les ALSS en 2012 (Suomalainen) ont ouvert les portes du Consortium MELiSSA, que l'UNIL a rejoint formellement début 2015, dans le cadre du renouvellement pour cinq ans du « Memorandum of Understanding » (MoU)⁵⁹⁰ de l'ESA liant ses membres (voir lettre d'intention du Prof. Suren Erkman à l'annexe XX et MoU signé par la direction de l'UNIL à l'Annexe XX).

Les auteurs recommandent de profiter de la signature de ce MoU pour renforcer les collaborations entre l'UNIL et les partenaires MELiSSA, ESA comprise. La participation formelle aux activités du

⁵⁹⁰ Memorandum of Understanding ESA 4000100203/10/NL/PA

consortium offrira notamment l'opportunité de : de poursuivre le projet Oïkosmos à l'UNIL estampillé d'un label MELiSSA/ESA, et donc de manière « officielle » ; d'accéder à de nouvelles sources de financement. L'UNIL pourrait par exemple dès l'automne 2015 héberger des thèses de doctorat traitant la problématique des systèmes clos, financées par des programmes tels que le POMP (« Pool of MELiSSA PhD ») de la Fondation MELiSSA⁵⁹¹. Deux des 18 sujets POMP d'un premier appel à candidatures ouvert à la mi-2015 ont été proposés par l'UNIL, à savoir « Adaptation of relevant biological processes of space regenerative life support system on terrestrial biorefineries » et « Valorization of space-compatible potable water production on Earth, in the perspective of industrial ecology » (voir descriptifs aux Annexes XX et XX) et plusieurs autres thématiques soumises ont un lien avec l'EI ou avec Oïkosmos (p. ex. « Technological Innovation, Entrepreneurship, and Strategic Management of MELiSSA technology and know how »). L'UNIL pourrait accueillir un ou plusieurs doctorants passe une année sur quatre chez un autre des partenaires MELiSSA dans le cadre de l'hébergement des autres thématiques.

Ce rapprochement entre MELiSSA et l'UNIL a également facilité des projets de transfert de savoir et/ou de technologie, avec par exemple la création d'une spin-off à partir des aspects conceptuels d'Oïkosmos, Earth Space Technical Ecosystem Entreprises SA (ESTEE)⁵⁹², cofondée en 2013 par le co-auteur de l'étude, Théodore Besson.

Sur la base du présent rapport, il a été également suggéré que l'UNIL joue un rôle moteur dans l'élaboration d'une stratégie institutionnelle visant à développer les activités liées à l'étude des systèmes clos en Suisse occidentale. La Direction de l'UNIL pourrait dès à présent explorer de manière plus approfondie la pertinence de positionner l'expertise et le savoir-faire des acteurs de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché de la région autour du domaine des systèmes clos. Dans cette perspective, il est proposé de planifier une deuxième phase du projet Oïkosmos à l'UNIL qui pourrait inclure les activités suivantes :

- Prise/renouvellement du contact avec les acteurs clés de du secteur spatial suisse comme la Swiss Space Office, la plateforme AP-Swiss (ESA/SSO), les principales entreprises et industries actives en Suisse occidentale (en particulier RUAG, etc.), et également une ou plusieurs des Directions des institutions de recherches et des acteurs de la chaîne de valeur Recherche-Innovation-Marché tels que les clusters de promotion des technologies, etc., en vue de créer un réseau de compétences autour de la thématique des systèmes clos ;
- Au niveau stratégique : création d'un « Comité de pilotage » (COPIL), basé à l'UNIL, chargé

⁵⁹¹ Relevons que la Fondation MELiSSA, nouvellement créée en 2014 est dotée de financements nationaux provenant des différents pays membres de l'ESA, en l'occurrence de la Swiss Space Office (SEFRI) dans le cas de la Suisse. Site web de la Fondation MELiSSA : www.melissafoundation.org

⁵⁹² Site web d'ESTEE : <https://est2e.com>

du haut pilotage du projet, de l'organisation et de la structuration de la démarche. Ce COPIL pourrait être composé de conseillers scientifiques, d'experts en innovation et de représentants d'organisations publiques. Le Tableau 4 dresse une liste de participants potentiels au COPIL dont la quasi-totalité a été rencontrée dans le cadre du rapport. Le nombre de participants au COPIL pourrait comprendre entre 8 et 12 personnes, avec aux minimums un représentant de l'UNIL, de l'EPFL, du CHUV, du CSEM, de la Swiss Space Office, d'une plateforme de promotion de l'innovation (ex : Innovaud), des clusters de promotion des technologies (ex : CleantechAlps, BioAlps, etc.) et du secteur spatial (plateforme AP-Swiss) ;

- Création et planification des activités de Groupes de travail thématiques (GTT) par le COPIL, sur la base d'un découpage selon les champs « Écologie industrielle », « Sciences omiques », « Technologie de l'information et de la communication » et « Habitat clos et durable ». Les activités des GTT viseraient à 1) élaborer des plans de recherche, des projets de développement technologique liés aux systèmes clos, ou des scénarii d'utilisation du simulateur (infrastructures, locaux, services, etc.) et à 2) planifier un programme préliminaire d'exécution du projet, selon l'importance des travaux projetés. La participation aux GTT serait ouverte aux groupes de recherches de l'UNIL et aux représentants des différentes institutions contactées par l'UNIL. Le COPIL se chargerait de nommer un responsable institutionnel pour chaque GTT ;
- Au niveau du « management de projet » : création d'un « Comité de projet » (COPRO), nommé par le COPIL et chargé du pilotage « technique » et opérationnel du projet. Le COPRO aurait pour tâche d'assurer la planification et la coordination de la phase d'étude (définition et suivi un plan d'action, gestion financière, etc.) et de la coordination des groupes de travail (organisation, déploiement et réalisation, puis consolidation de leurs travaux). Cette cellule opérationnelle serait composée de 3 à 5 personnes des milieux académiques, industriels, économiques et politiques ;
- Création d'un « Comité scientifique consultatif » (COCONS) composé de représentants et des différents milieux académiques, industriels et institutionnels des différents clusters de Suisse occidentale, ainsi que des responsables des groupes de travail. Le COCONS fonctionnerait comme un émulateur d'idées et un organe d'évaluation d'opportunités proposées par le COPIL ou les GTT. Il aurait également pour objectif de faciliter l'intégration des diverses disciplines.

Sur la base de la stratégie institutionnelle menée par le COPIL et des projets d'activités de (R&D/TT) élaborés par les GTT en coordination avec le COPRO, cette phase pilote d'une durée de 18 à 24 mois aurait pour objectif de poser un cadre et de définir les jalons en vue d'évaluer ensuite l'opportunité d'un dépôt d'un « dossier de candidature officielle » pour héberger en Suisse – et en particulier en Suisse occidentale – tout ou partie des activités opérationnelles d'un simulateur d'ECA. Si en retour une décision de principe se dessine en ce sens, il s'agirait d'entamer la troisième phase du volet suisse

d'Oïkosmos, qui viserait à évaluer le cadre juridique et le statut d'un projet de structure pour le portage du projet, élaborer un plan directeur et un « business plan » adapté, rechercher de financements complémentaires auprès d'institutions publiques et privées, et enfin élargir et disséminer la démarche. Dans cette dernière phase, il pourrait être bénéfique de s'associer de parties prenantes habituées à déposer des dossiers de candidature pour des méga-projets, par exemple dans le domaine du sport (le CIO ou l'UEFA pour ne citer qu'eux) et de capitaliser sur l'expérience provenant des comités d'organisation de projet académique d'envergure comme le Human Brain Project, Nano-Tera, sans oublier de s'inspirer sur le modèle du CERN (voir §23.1) qui a su fédérer des parties prenantes à l'internationale au sein d'une infrastructure à même de répondre à des questions spécifiques de physique fondamentale.

LISTE DE PARTICIPANTS POTENTIELS AU COMITÉ DE PILOTAGE PARMILLES PARTIES PRENANTES DE SUISSE OCCIDENTALE					
Proposition de représentant	Fonction	Organisation	Groupe / Unité / Entité	Domaines, thématique et sujets de recherche / mots clés	
Suren	Prof.	UNIL	Groupe Écologie industrielle de la FCSE	Écologie industrielle, gestion durable des ressources, métabolisme industriel, symbiose industrielle, Dynamiques technologiques, écosystèmes d'os artificiels, éco-innovation, Métabolisme du carbone, valorisation du CO2, transition énergétique	
Fabrizio	Prof.	UNIL	Laboratoire de psychologie sociale	Apprentissage; comparaison sociale, compétences, compétition, conflit, coopération, discriminations, minorités, persuasion	
Philippe	Vice-recteur Recherche et Relations Internationales	UNIL	Direction / Unité de recherche - Pathogénèse microbienne de la FBM	Pathogénèse microbienne, biochimie de la paroi cellulaire, bactérie Gram-positive, transfert de savoir et de technologie, résistance aux antibiotiques	
Christian S.	Prof.	UNIL	Groupe Bases moléculaires de la croissance et du développement des plantes de la FBM	Bases moléculaires de la croissance et du développement des plantes; génétique du développement et de la morphogénèse; biologie végétale; croissance	
Jan Roelof	Prof.	UNIL	Unité de recherche - Microbiologie environnementale et de l'évolution de la FBM	Microbiologie environnementale, processus d'adaptation génétique des bactéries; bioreporters bactériens, évolution, voies métaboliques, régulation, expression des gènes, écologie microbienne appliquée, whole-cell biosensors	
Ioannis	Directeur	UNIL	Vital-IT - Bioinformatique	Santé, biologie computationnelle, biologie expérimentale, bioinformatique, modélisation des systèmes biologiques complexes	
Claude	Prof. (EPFL) Président (CSEM)	EPFL / CSEM	Swiss space center / Conseil d'administration	Astronaute ESA, technologies et opérations spatiales; maintenance; télescope; Hubble; vol spatiaux	
Patrick	Président	EPFL	Présidence / Laboratoire d'étude sur la neurodégénérescence	Neurosciences, sciences de la vie, neurodégénérescence, thérapie génique, cellules encapsulées	
Philippe	Vice-président pour les affaires académiques	EPFL	Direction / Laboratoire de sciences de la Terre et des planètes - LSTP de la Faculté SB	Techniques de physique et de chimie appliquée au comportements des matériaux de la Terre, processus de la surface, du manteau et du noyau terrestres, météorites martiens.	
Giovanni	Directeur IEL	EPFL	Laboratoire des systèmes intégrés - LSI de la Faculté STI	Design de technologies pour les nanosystèmes, nanocircuits, nano devices, nanotube de carbone, intégration 3D, biosystèmes, senseurs actifs et passifs pour l'ADN et les protéines	
Vincent	Chef de département, chef de service	CHUV	Service de Biomédecine - BIO	Médecine personnalisée, médecine moléculaire et translationnelle, biomédecine	
Georges	Vice-président	CSEM	Direction	Télécommunications sans fil, domaine biomédical, microsystems, nanotechnologies	
Benoît	Président	BioAlps	Direction	Sciences de la vie, technologies, innovation	
Eric	Chief Operating Officer	CleantechAlps	Direction	Cleantech, écotecnologies, photovoltaïque, valorisation des déchets, smart grids, écologie industrielle et « enabling technologies »	
Danick	Secrétaire général	Micronarc	Direction	Microtechnologies, nanotechnologies	
Didier	Secrétaire exécutif	Alp ICT	Direction	Technologies de l'information et de la communication.	
Patrick	Directeur	Innovaud	Direction	Aérospatial, innovation, partenariat, soutien, TIC et technologies mobiles, développement de logiciels, smart grid	
Daniel	Directeur	Swiss space office	Secrétariat d'Etat à la formation, à la recherche et à l'innovation	Relations internationales, affaires nationales, stratégies industrielles, technologies spatiales, communication et éducation	
José	Managing Director	AP-Swiss	ESA-IAP Ambassador Platform for applications and services	Systèmes spatiaux: télécommunications, navigation, observation de la Terre, technologies spatiales, vols spatiaux.	

Tableau 4: Liste des participants potentiels au Comité de pilotage

25 Conclusions générales

Conformément aux objectifs décrits au §3.1, le présent rapport a permis :

- à la Partie I, d'introduire la notion d'ECA (Objectif I) ;
- à la Partie II, de démontrer l'intérêt de conduire des synergies de recherche terrestres et spatiales dans un simulateur d'ECA, et de les cataloguer (Objectif II) ;
- à la Partie III, d'explorer les opportunités de transfert de savoir et de technologie offertes par un simulateur d'ECA permettant de le positionner comme une plateforme technologique de premier plan pour l'étude des systèmes clos (Objectif III) ;
- à la Partie IV, de discuter les opportunités que pourrait offrir l'hébergement d'un simulateur d'ECA en Suisse occidentale pour son écosystème de l'innovation et pour le secteur spatial suisse (Objectif IV) ;
- à la Partie V, de proposer des mesures d'accompagnement à l'ESA (Objectif V.A) et d'émettre des recommandations et des suggestions à la Direction de l'Université de Lausanne (Objectif V.B).

Partant du constat que seules les missions interplanétaires habitées dotées de systèmes de support-vie avancés (ALSS) semblent pouvoir se réaliser à terme, cette étude a cherché à démontrer les raisons et les moyens de miniaturiser, artificialiser et manipuler, parfois jusqu'à l'extrême des écosystèmes clos à même de remplir les fonctions d'un tel ALSS spatial.

Lors de la préparation au sol de ces missions, ces systèmes biorégénératifs devront être testés dans un démonstrateur technologique, le simulateur d'ECA. Le développement d'un tel habitat clos constituera un laboratoire pour la conception et l'étude de systèmes circulaires bioinspirés et durables, capables de boucler quasi totalement les flux de matières y circulant dans un environnement de faible volume, à la fois confiné et isolé, et en présence de ressources limitées. L'objet majeur du présent rapport entendait saisir les enjeux induits par cette ambition de fermer des cycles de matières via un simulateur d'ECA, tout en assurant son bon fonctionnement – à la fois fiable et stable – sur des périodes prolongées.

Au cours du rapport, les auteurs ont bénéficié d'une carte blanche pour explorer et articuler les multiples thématiques permettant la mise en place dans une telle installation de synergies de recherche à la convergence des dimensions spatiales et terrestres des ECA. L'approche synergistique confère précisément au projet un intérêt clair pour appréhender la durabilité terrestre. De par son caractère novateur et son vaste champ d'application, Oïkosmos ambitionne ainsi non seulement de satisfaire aux besoins scientifiques et technologiques spécifiques des habitats spatiaux, mais touche également les problématiques terrestres telles que la raréfaction des ressources matérielles et la dissipation croissante de polluants dans les écosystèmes naturels. Le simulateur d'ECA pourra ainsi être utilisé à bon escient

pour améliorer notre compréhension du fonctionnement des écosystèmes terrestres. Ce qui signifie d'une part que la R&D liée à l'exploration spatiale habitée est adéquate pour aborder le management durable des ressources en habitat clos et d'autre part qu'une telle station de recherche au sol est un analogue utile pour l'étude et la mise en œuvre de la durabilité terrestre. Il ressort de l'analyse qu'il paraît justifié de développer des ECA uniquement sur la base de leur pertinence pour la durabilité terrestre, et indépendamment de leur intérêt spatial intrinsèque.

Rassemblant des approches intégrative, interdisciplinaire et multi-échelles, la démarche a permis de compiler un agenda de recherche qui associe les sciences de la vie et celles de l'environnement avec le génie des bioprocédés et l'ingénierie des systèmes, ainsi que les microtechnologies. Les synergies de recherche associées au programme Oïkosmos devraient permettre d'accomplir des progrès dans les domaines de l'écologie industrielle, de la biologie systémique, des technologies de l'information et de la communication. Combinés ensemble, ces domaines permettent d'envisager un l'habitat clos à la fois durable, autosuffisant, autonome, sain et intelligent.

Élément central de son programme de recherche, le simulateur d'ECA devra s'employer à intégrer un vaste nombre de sciences et de technologies parmi les plus émergentes et les plus efficaces au sein d'une même plateforme de recherche. Les synergies y qui y prendront place auront le potentiel pour générer des transferts de savoir et de technologie à la fois du spatial vers le terrestre (spin-out), mais également du terrestre au spatial (spin-in) dans une perspective mutuellement bénéfique pour le développement des ECA. Cette plateforme expérimentale est appelée à devenir un véritable « couteau suisse » pour l'analyse des flux de matières, de molécules et d'informations circulant au sein d'écosystèmes fermés. En sa qualité de boîte à outils pour l'étude des systèmes clos, elle aura pour vocation d'accomplir des activités de recherche variées – non successives, mais corrélées –, pour le développement des briques technologiques nécessaires à la mesure, la modélisation, le pilotage, la biosurveillance et le maintien de l'homéostasie d'un ECA, avec son lot de contraintes techniques, économiques, environnementales, énergétiques, sociales, etc.

Oïkosmos ne prétend pas résoudre tout ce qui concerne l'écologie. Il s'agit avant tout d'un projet d'écologie *en système clos* dans lequel le recyclage est exacerbé par l'étroitesse du site. Mais si l'on aspire à ce que l'étude de ces modèles réduits très significativement puisse véritablement offrir des conseils pour résoudre des enjeux plus larges – c'est-à-dire à l'échelle de la planète entière – inextricablement liés à la durabilité terrestre, il paraît nécessaire d'extraire certaines de leur fonction afin de les dimensionner à plus grande échelle (cas du recyclage décentralisé des eaux usées), ou alors d'inclure un approvisionnement externe supplémentaire (cas de l'apport de CO₂ permettant d'étendre largement la quantité de molécules organiques circulant dans le système).

Poussé par la volonté d'améliorer ses conditions de vie, l'être humain a tendance à s'appuyer sur les progrès scientifiques pour prévenir ou résoudre ses problèmes de santé et ceux liés à l'impact

environnemental de ses activités socio-économiques. Ainsi, malgré les conditions environnementales globales qui ne cessent de se détériorer, l'homme dispose aujourd'hui d'un éventail exceptionnel de moyens possibles pour vivre sainement. Les récentes innovations sociales, scientifiques et médicales offrent plus d'opportunités que jamais auparavant pour prévenir, guérir ou retarder l'évolution de maladies. En ce sens, Oïkosmos est également un projet de santé, puisque son objectif premier est de garantir la survie d'un équipage d'humains sur une longue période. En ce sens, le simulateur d'ECA est un instrument précieux pour démontrer non seulement comment viser un recyclage intégral et une production de nourriture efficace en habitat clos, mais également comment y vivre au mieux – en plus d'y survivre – en optimisant son habitabilité et en personnalisant l'expérience utilisateur de ses occupants malgré les fortes contraintes en présence (Figure 23).

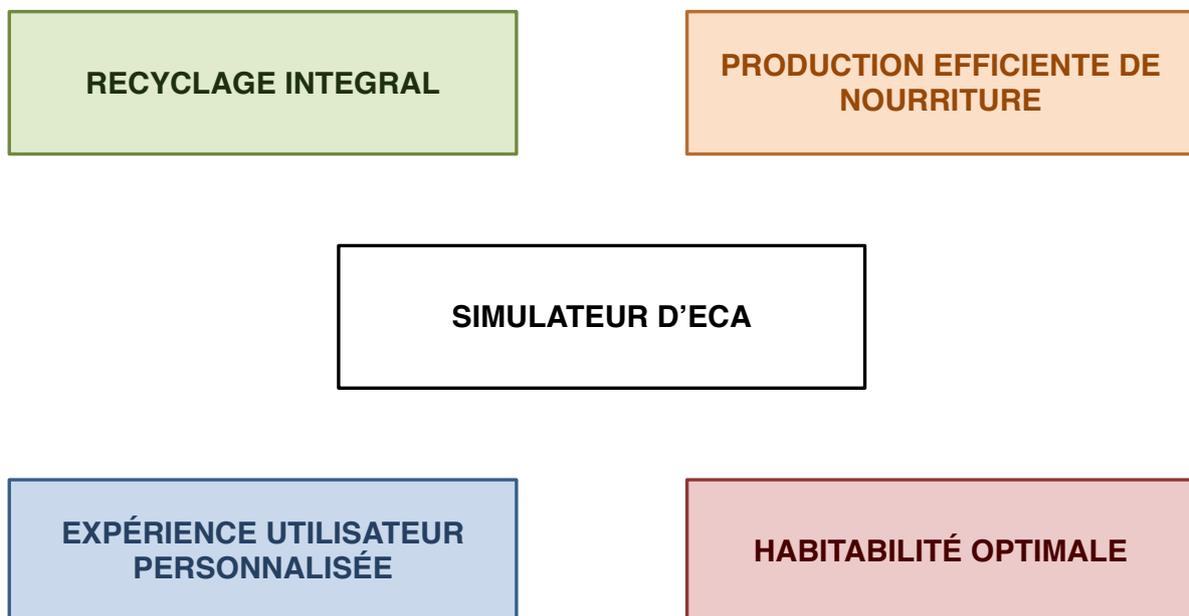


Figure 23: Enjeux d'un simulateur d'ECA

En plus de viser un recyclage intégral et une production de nourriture efficace en habitat clos, le simulateur d'ECA permet de démontrer comment y vivre au mieux – en plus d'y survivre – en optimisant son habitabilité et en personnalisant l'expérience utilisateur de ses occupants, malgré les fortes contraintes en présence.

Oïkosmos se positionne comme un projet audacieux qui semble à même de créer une impulsion décisive pour le rayonnement de la recherche sur les systèmes clos. L'agenda de recherche sur les ECA permet de formuler des questions en conditions extrêmes. Dès lors, il est envisageable que les réponses trouvées puissent permettre de développer des applicatifs que l'on n'aurait pas identifiés dans des conditions normales.

Bien entendu, la concrétisation d'un programme de recherche aussi ambitieux nécessitera encore de nombreuses avancées scientifiques et technologiques. Entre-temps, Oïkosmos pourrait servir de

tremplin au développement technologique de solutions innovantes et exemplaires, avec des applications terrestres d'ECA prometteuses basées sur l'utilisation d'un module ou d'une technologie, ou d'une combinaison d'entre elles. Les retombées positives de la diffusion de ces technologies nouvelles ou émergentes du programme Oïkosmos devraient contribuer, à leur échelle, à la résolution de questions et défis urgents auxquels la société européenne est confrontée, tant au niveau de gestion de l'environnement que de celle de la santé humaine.

BIBLIOGRAPHIE

- Academie suisse des sciences techniques, 2009. *Biocarburants – Opportunités et limites*, SATW.
- Agence de l'eau Seine-Normandie, la Prospective et de l'Evaluation Environnementales, de, D.D.E.Pôle Evaluation et Prospective, 2002. *Analyse économique de la récupération des coûts*,
- Agristat, 2016. *Statistische Erhebungen und Schätzungen über Landwirtschaft und Ernährung*, Schweizer Bauernverband.
- Alberts, B. et al., 2002. *Molecular biology of the cell* 4 ed., Garland Science.
- Allen, J.P.J., Nelson, M.M. & Alling, A.A., 2003. The legacy of Biosphere 2 for the study of biospherics and closed ecological systems. *Advances in Space Research*, 31(7), pp.1629–1639.
- Alloul, A. et al., 2019. Volatile fatty acids impacting phototrophic growth kinetics of purple bacteria: Paving the way for protein production on fermented wastewater. *Water Research*, 152, pp.138–147.
- Alphei, J., Bonkowski, M. & Scheu, S., 1996. Protozoa, Nematoda and Lumbricidae in the Rhizosphere of *Hordelymus europaeus* (Poaceae): Faunal Interactions, Response of Microorganisms and Effects on Plant Growth. *Oecologia*, 106(1), pp.111–126.
- Alyass, A., Turcotte, M. & Meyre, D., 2015. From big data analysis to personalized medicine for all: challenges and opportunities. *BMC Medical Genomics*, 8(1), p.33.
- Ames, B.N., 2006. Low micronutrient intake may accelerate the degenerative diseases of aging through allocation of scarce micronutrients by triage. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(47), pp.17589–17594.
- Anastas, P.T. & Warner, J.C., 1998. *Green Chemistry: Theory and Practice*, Oxford, UK: Oxford University Press.
- Anderson, C., 2012. *Makers : La nouvelle révolution industrielle*, Pearson.
- Andre, M., Thiéry, J. & Cournac, L., 1994. ECOSIMP2 model: Prediction of CO₂ concentration changes and carbon status in closed ecosystems. *Advances in space research*, 14(11), pp.323–326.
- Andrews, D.G. et al., 2015. Defining a successful commercial asteroid mining program. *Acta Astronautica*, 108(0), pp.106–118.
- Aprobase International, 2013. *Wearable technology. Rapport de veille ICT n°2013-17*, AlpICT.
- Arai, T. et al., 2008. Educational tool for modeling and simulation of a closed regenerative life support system. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.1100–1105.
- Aresta, M. & Dibenedetto, A., 2007. Utilisation of CO₂ as a chemical feedstock: opportunities and challenges. *Dalton Trans. VL -*, (28), pp.2975–2992.
- Arumugam, M. et al., 2011. Enterotypes of the human gut microbiome. *Nature*, 473(7346), pp.174–180.
- Ashida, A., 2003. Considerations of design for life support systems. *Advances in Space Research*, 31(7), pp.1805–1809.

- Aydogan-Cremaschi, S. et al., 2009. A novel approach for life-support-system design for manned space missions. *Acta Astronautica*, 65(3-4), pp.330–346.
- Ayres, R.U., 1994. Industrial Metabolism: Theory and Policy. In B. R. Allenby & D. J. Richards, eds. *The Greening of Industrial Ecosystems*. National Academy Press, pp. 23–37.
- Ayres, R.U., 2004. On the life cycle metaphor: where ecology and economics diverge. *Ecological Economics*, 48(4), pp.425–438.
- Bainbridge, W.S., 2009. Motivations for space exploration. *Futures*, 41(8), pp.514–522.
- Baker, M., 2011. Metabolomics: from small molecules to big ideas. *Nature Methods*, 8(2), pp.117–121.
- Baliga, N.S., 2008. Systems biology: the scale of prediction. *Science*, 320(5881), pp.1297–1298.
- Bamsey, M., Berinstain, A., et al., 2009. Four-month Moon and Mars crew water utilization study conducted at the Flashline Mars Arctic Research Station, Devon Island, Nunavut. *Advances in Space Research*, 43(8), pp.1256–1274.
- Bamsey, M., Graham, T., et al., 2009. Canadian advanced life support capacities and future directions. *Advances in Space Research*, 44(2), pp.151–161.
- Baranowski, T. et al., 2012. Food Intake Recording Software System, version 4 (FIRSSt4): a self-completed 24-h dietary recall for children. *Journal of Human Nutrition and Dietetics*, pp.no–no.
- Baratto, C. et al., 2005. Monitoring plants health in greenhouse for space missions. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 108(1-2), pp.278–284.
- Barbey, P. & Lallement, J.-P., 2012. *Innovaud - Innovation parks and Vaudparks*, Association vaudoise pour la promotion des innovations et technologies - AIT.
- Bassingthwaighe, J.B., 2008. Strategies for the Physiome Project. *Annals of Biomedical Engineering*, 28(8), pp.1043–1058.
- Bauer, W.D. & Robinson, J.B., 2002. Disruption of bacterial quorum sensing by other organisms. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(3), pp.234–237.
- Baveye, P.C., 2009. To sequence or not to sequence the whole-soil metagenome?, 7(10), pp.756–756.
- Bayon-Vicente, G., 2020. Global Proteomic Analysis Reveals High Light Intensity Adaptation Strategies and Polyhydroxyalkanoate Production in *Rhodospirillum rubrum* Cultivated With Acetate as Carbon Source. *fmicb-11-00464.tex*, pp.1–17.
- Bechtel, R.B. & Berning, A., 1991. The third-quarter phenomenon: do people experience discomfort after stress has passed? *From Antarctica to outer space*.
- Bechy-Loizeau, A.-L., Flandrois, J.-P. & Abaibou, H., 2015. Assessment of polycarbonate filter in a molecular analytical system for the microbiological quality monitoring of recycled waters onboard ISS. *Life Sciences in Space Research*, 6, pp.29–35.
- Beck, J.M., Young, V.B. & Huffnagle, G.B., 2012. The microbiome of the lung. *Translational Research*, pp.1–9.
- Beech, M., 2009. *Terraforming: The Creating of Habitable Worlds* 2nd ed., New York, NY: Springer-Verlag New York Inc.

- Bengmark, S., 1998. Ecological control of the gastrointestinal tract. The role of probiotic flora. *Gut*, 42(1), pp.2–7.
- Benjaminson, M.A., Lehrer, S. & Macklin, D.A., 1998. Bioconversion systems for food and water on long term Space missions. *Acta Astronautica*, 43(3-6), pp.329–348.
- Benke, K. & Tomkins, B., 2017. Future food-production systems: vertical farming and controlled-environment agriculture. *SUSTAINABILITY: SCIENCE, PRACTICE AND POLICY*, 0(0), pp.13–26.
- Benyus, J.M., 1997. *Biomimicry: Innovation Inspired by Nature*, New York: HarperCollins.
- Berecibar, M. et al., 2016. Critical review of state of health estimation methods of Li-ion batteries for real applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, pp.572–587.
- Bergen, von, M. et al., 2013. Insights from quantitative metaproteomics and protein-stable isotope probing into microbial ecology. 7(10), pp.1877–1885.
- Beyers, R.J. & Odum, H.T., 1993. *Ecological microcosms*, New York: Springer.
- Blaser, M., 2011. Stop the killing of beneficial bacteria. *Nature*, 476, pp.1–2.
- Blaser, M.J., 2010. Harnessing the power of the human microbiome. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(14), pp.6125–6126.
- Blaser, M.J. & Falkow, S., 2009. What are the consequences of the disappearing human microbiota? *Nature Reviews Microbiology*, 7(12), pp.887–894.
- Bloch, J., Scherrer, U. & Sartori, C., 2007. Programmation fœtale : un facteur de risque méconnu des maladies cardiovasculaires et métaboliques. *Revue médicale suisse*, 3(131), pp.–.
- Bluem, V. & Paris, F., 2002. Novel aquatic modules for bioregenerative life-support systems based on the closed equilibrated biological aquatic system (CEBAS). *Acta Astronautica*, 50(12), pp.775–785.
- Bornemann, G. et al., 2015. Natural microbial populations in a water-based biowaste management system for space life support. *Life Sciences in Space Research*, 7(C), pp.39–52.
- Borrell, B., 2011. Epidemiology: Every bite you take. *Nature*, 470(7334), pp.320–322.
- Boscheri, G. et al., 2012. Modified energy cascade model adapted for a multicrop Lunar greenhouse prototype. *Advances in space research*, 50(7), pp.941–951.
- Brack, A. et al., 2002. Do meteoroids of sedimentary origin survive terrestrial atmospheric entry? The ESA artificial meteorite experiment STONE. *Planetary and Space Science*, 50(7-8), pp.763–772.
- Briand, F. & Cohen, J.E., 1987. Environmental Correlates of Food Chain Length. *Science, New Series*, 238(4829), pp.956–960.
- Brooks, D.R. & Wiley, E.O., 1986. *Evolution As Entropy: Toward a Unified Theory of Biology*, University of Chicago Press.
- Brown, L. & van der Ouderaa, F., 2007. Nutritional genomics: food industry applications from farm to fork. *British Journal of Nutrition*, 97(06), p.1027.

- Brunet, J. & Gerbi, O., 2009. ALISSE: Advanced Life Support System Evaluator, A Tool for ESA & Space Industries. In European Advanced Life Support Workshop, ESA HQ, Paris, 21 September 2009.
- Bubenheim, D.L. et al., 1997. Incineration of biomass and utilization of product gas as a CO₂ source for crop production in closed systems: Gas quality and phytotoxicity. *Advances in Space Research*, 20(10), pp.1845–1850.
- Bull, C. & Fenech, M., 2008. Genome-health nutrigenomics and nutrigenetics: nutritional requirements or “nutriomes” for chromosomal stability and telomere maintenance at the individual level. *Proceedings of the Nutrition Society*, 67(02), pp.146–156.
- Burschka, J. et al., 2013. Sequential deposition as a route to high-performance perovskite-sensitized solar cells. *Nature*, 499(7458), pp.316–319.
- Canganella, F. et al., 2012. Microbial ecology of space confined habitats and biofilm development on space materials: the project mars500 - MICHA. In International Astronautical Congress, microgravity sciences and processes symposium. Italy.
- Caron-Lormier, G. et al., 2009. How might we model an ecosystem? *Ecological modelling*, 220(17), pp.1935–1949.
- Cavazzoni, J., 2004. Using explanatory crop models to develop simple tools for Advanced Life Support system studies. *Advances in Space Research*, 34(7), pp.1528–1538.
- Chen, X. et al., 2018. Astroplastic: A start-to-finish process for polyhydroxybutyrate production from solid human waste using genetically engineered bacteria to address the challenges for future manned Mars missions. 45(4–5), pp.1827–51.
- Chertow, M.R., 2000. Industrial symbiosis: literature and taxonomy. *Annual Review of Energy and Environment*, 25, pp.313–337.
- Chèvre, N. & Erkman, S., 2011. *Alerte aux micropolluants - Pesticides, biocides, détergents, médicaments et autres substances chimiques dans l'environnement*, Presses polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), Collection Le savoir suisse.
- Chèvre, N., Gagné, F. & Blaise, C., 2003. Development of a biomarker-based index for assessing the ecotoxic potential of aquatic sites. *Biomarkers*, 8(3-4), pp.287–298.
- Chiu, L. et al., 2017. Protective Microbiota: From Localized to Long-Reaching Co-Immunity. *Frontiers in immunology*, 8, pp.1678–1678.
- Cissé, M. et al., 2015. Preservation of mango quality by using functional chitosan-lactoperoxidase systems coatings. *Postharvest Biology and Technology*, 101, pp.10–14.
- Clancy, P., Brack, A. & Horneck, G., 2005. *Looking For Life, Searching The Solar System*, Cambridge University Press.
- Clements, F., 1916. *Plant Succession: an analysis of the development of vegetation*, Publication No. 242. Washington DC.
- Clements, F.E., 1936. Nature and structure of the climax. *Journal of Ecology*, 24, pp.252–284.
- Clements, F.E. & Shelford, V., 1930. *Bio-Ecology*, New York: Wiley.
- Clynes, M.E. & Kline, N., 1960. Cyborgs and Space. *Astronautics*.

- Cogne, G., Cornet, J.-F. & Gros, J.B., 2005. Design, Operation, and Modeling of a Membrane Photobioreactor to Study the Growth of the Cyanobacterium *Arthrospira platensis* in Space Conditions. *Biotechnology Progress*, 21(3), pp.741–750.
- Cohen, M.M., Flynn, M.T. & Matossian, R.L., 2012. Water Walls Architecture: Massively Redundant and Highly Reliable Life Support for Long Duration Exploration Missions. In *Global Space Exploration Conference*. Washington DC, US.
- Cohu, C.M. et al., 2014. Increased nutritional quality of plants for long-duration spaceflight missions through choice of plant variety and manipulation of growth conditions. *Acta Astronautica*, 94(2), pp.799–806.
- Collins, P. & Autino, A., 2010. What the growth of a space tourism industry could contribute to employment, economic growth, environmental protection, education, culture and world peace. *Acta Astronautica*, 66(11-12), pp.1553–1562.
- Comet, B. et al., 2000. *REGLISSE - Review of European Ground Laboratories and Infrastructures for Sciences and Support Exploration*, ESA Internal study.
- Commission Européenne, 2009. La e-santé en Europe. *Les Dossiers Européens*, (17), pp.1–49.
- Committee on Human Exploration, 1997. *The Human Exploration of Space* National Research Council, ed.,
- Conley, C.A. & Rummel, J.D., 2008. Planetary protection for humans in space: Mars and the Moon. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.1025–1030.
- Conseil stratégique des industries de santé Comité stratégique de filière Industries et technologies de santé, 2013. *Industries et technologies de santé*,
- Cooney, C.A.C., 2006. Germ cells carry the epigenetic benefits of grandmother's diet. *PNAS*, 103(46), pp.17071–17072.
- Cooper, M., Douglas, G. & Perchonok, M., 2011. Developing the NASA Food System for Long-Duration Missions. *Journal of Food Science*, 76(2), pp.R40–R48.
- Cooper, M.R., Catauro, P. & Perchonok, M., 2012. Development and evaluation of bioregenerative menus for Mars habitat missions. *Acta Astronautica*, 81(2), pp.555–562.
- Cordell, D., Drangert, J.-O. & White, S., 2009. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change*, 19(2), pp.292–305.
- Cornet, J.F., Dussap, C. & Gros, J.B., 1998. Kinetics and energetics of photosynthetic microorganisms in photobioreactors. In *Bioprocess and Algae Reactor Technology, Apoptosis*. Springer Berlin / Heidelberg, pp. 153–224.
- Côté, R. & Hall, J., 1995. Industrial parks as ecosystems. *Journal of Cleaner Production*, 3(1), pp.41–46.
- Cristancho, S. & Vining, J., 2004. Culturally defined keystone species. *Human Ecology Review*.
- Crucian, B. et al., 2009. *Human Research Program - Human Health Countermeasures Element - Evidence Book - Risk of Crew Adverse Event Due to Altered Immune Response* National Aeronautics and Space Administration, ed., National Aeronautics and Space Administration, Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas.

- Czupalla, M. et al., 2004. Analysis of a spacecraft life support system for a Mars mission. *Acta Astronautica*, 55(3-9), pp.537–547.
- Czupalla, M., Horneck, G. & Blome, H.J., 2005. The conceptual design of a hybrid life support system based on the evaluation and comparison of terrestrial testbeds. *Advances in Space Research*, 35(9), pp.1609–1620.
- Dang, L. et al., 2009. Cancer-associated IDH1 mutations produce 2-hydroxyglutarate. *Nature*, 462(7274), pp.739–744.
- Daniels, R., Vanderleyden, J. & Michiels, J., 2004. Quorum sensing and swarming migration in bacteria. *FEMS Microbiology Reviews*, 28(3), pp.261–289.
- Darensbourg, D.J., 2010. Chemistry of Carbon Dioxide Relevant to Its Utilization: A Personal Perspective. *Inorganic Chemistry*, 49(23), pp.10765–10780.
- Darensbourg, D.J., 2007. Making Plastics from Carbon Dioxide: Salen Metal Complexes as Catalysts for the Production of Polycarbonates from Epoxides and CO₂. *Chemical Reviews*, 107(6), pp.2388–2410.
- Dawkins, R., 1999. *The Extended Phenotype: The Long Reach of the Gene* 2nd ed., Oxford Paperbacks.
- de Bono, B. & Hunter, P., 2012. Integrating knowledge representation and quantitative modelling in physiology. *Biotechnology Journal*, 7(8), pp.958–972.
- De Feo, G. et al., 2010. Water and wastewater management technologies through the centuries. *Water Supply*, 10(3), pp.337–349.
- De Filippo, C. et al., 2010. Impact of diet in shaping gut microbiota revealed by a comparative study in children from Europe and rural Africa. *PNAS*, 107(33), pp.14691–14696.
- De Middeleer, G. et al., 2019. Fungi and Mycotoxins in Space—A Review. *Astrobiology*, 19(7), pp.915–926.
- De Paepe, J. et al., 2018. Refinery and concentration of nutrients from urine with electrodialysis enabled by upstream precipitation and nitrification. *Water Research*, 144, pp.76–86.
- De Rosnay, J., 2000. *L'homme symbiotique* Nouv. éd, Seuil.
- DellaPenna, D., 1999. Nutritional Genomics: Manipulating Plant Micronutrients to Improve Human Health. *Science*, 285(5426), pp.375–379.
- Demey, D. et al., 2000. BIORAT: Preliminary Evaluation of Biological Life Support in Space Environment. In 30th International Conference on Environmental Systems (SAE paper 2384), Toulouse, France. Warrendale, PA: SAE International, pp. 2000–01–2384.
- Dempster, W.F., 2008. Tightly closed ecological systems reveal atmospheric subtleties - experience from Biosphere 2. *Advances in Space Research*, 42(12), pp.1951–1956.
- Deschenes, P.J. & Chertow, M., 2004. An island approach to industrial ecology: towards sustainability in the island context. *Journal of Environmental Planning ...*, 47(2), pp.201–217.
- Despommier, D., 2010. *The Vertical Farm: Feeding the World in the 21st Century*, Saint Martin's Press Inc.

- DeVincenzi, D.L., Stabekis, P. & Barengoltz, J., 1996. Refinement of planetary protection policy for Mars missions. *Advances in Space Research*, 18(1-2), pp.311–316.
- DFE ed., 2011. *Masterplan Cleantech 2011*, DETEC.
- Diggle, S.P. et al., 2007. Cooperation and conflict in quorum-sensing bacterial populations. *Nature*, 450(7168), pp.411–414.
- Dobrindt, U. et al., 2004. Genomic islands in pathogenic and environmental microorganisms. *Nature Reviews Microbiology*, 2(5), pp.414–424.
- Douay, S., 2003. Tests génétiques en entreprise - Une irruption à contre-courant de la législation sociale. *Revue internationale de droit économique*, t. XVII, 2(2), pp.233–272.
- Doule, O. et al., 2014. Self-deployable Habitat for Extreme Environments-Universal Platform for Analog Research.
- Drake, B.G., Hoffman, S.J. & Beaty, D.W., 2010. Human exploration of Mars, Design Reference Architecture 5.0. *IEEE Aerospace Conference. Proceedings*, pp.1–24.
- Drysdale, A. et al., 2008. Use of sunlight for plant lighting in a bioregenerative life support system – Equivalent system mass calculations. *Advances in Space Research*, 42(12), pp.1929–1943.
- Eckart, P., 1997. *Spaceflight Life Support and Biospherics* 1st ed., Springer.
- Ehrenfeld, J.R., 2004. Can Industrial Ecology be the " Science of Sustainability"? *Journal of Industrial Ecology*, 8(1/2), p.1.
- El-Nakhel, C. et al., 2019. Cultivar-Specific Performance and Qualitative Descriptors for Butterhead Salanova Lettuce Produced in Closed Soilless Cultivation as a Candidate Salad Crop for Human Life Support in Space. *Life (Basel, Switzerland)*, 9(3), p.61.
- Ellen MacArthur Foundation, 2013. *Towards the circular economy*, Ellen MacArthur Foundation.
- Elmahdi, A., 2008. Biomimicry of Termite Engineering As Innovative Solution for Water and Soil Conservation. *Resources, Conservation & Recycling*.
- Engel, V.C. & Odum, H.T., 1999. Simulation of community metabolism and atmospheric carbon dioxide and oxygen concentrations in Biosphere 2. *Ecological Engineering*, 13(1-4), pp.107–134.
- Erickson, J.D. et al., 1996. Mission Simulation as an Approach to Develop Requirements for Automation in Advanced Life-Support-Systems. *Advances in Space Research*, 18(1/2), pp.191–196.
- Erkman, S., 2001. Industrial Ecology: a new perspective on the future of the industrial system. In *Industrial Ecology and Sustainability*. UTT Troyes.
- Erkman, S., 1997. Industrial ecology: an historical view. *Journal of Cleaner Production*, 5(1), pp.1–10.
- Erkman, S., 2004. *Vers une écologie industrielle*, Charles Leopold Mayer.
- Erkman, S. & Besson, T., 2011. L’avenir de l’industrie est vert et collaboratif Technology by Bilan - édition spéciale sur CleantechAlpsBII, eds. *Bilan*, pp.40–42.

- Erkman, S. & Besson, T., 2010. L'écologie industrielle : une nouvelle stratégie de développement. *Environnement Ambiente e Territorio in Valle d'Aosta*, (47), pp.21–24.
- Erkman, S. & Chèvre, N., 2006. *Oikosmos technical note 6 - TN6 - Field «Industrial ecology» & Specific Areas «Ecotoxicology», «Epistemology», «Science Policy» and «Communication»*, ICAST.
- Escher, B.I.B. et al., 2008. Monitoring of the ecotoxicological hazard potential by polar organic micropollutants in sewage treatment plants and surface waters using a mode-of-action based test battery. *Journal of Environmental Monitoring*, 10(5), pp.622–631.
- European Science Foundation, 2000. *ESA's Research plan in Life & Physical Sciences in Space*, European Science Foundation.
- Ezzeldin, S. et al., 2019. Current Understanding of Human Metaproteome Association and Modulation. *Journal of Proteome Research*, 18(10), pp.3539–3554.
- Fahriou, J. et al., 2020. Microbial Monitoring in the EDEN ISS Greenhouse, a Mobile Test Facility in Antarctica. *Frontiers in microbiology*, 11, p.525.
- Fajardo-Cavazos, P., Schuerger, A.C. & Nicholson, W.L., 2007. Testing interplanetary transfer of bacteria between Earth and Mars as a result of natural impact phenomena and human spaceflight activities. *Acta Astronautica*, 60(4-7), pp.534–540.
- Falquet, J. & Hurni, J.-P., 2006. *Spiruline Aspects Nutritionnels*, Antenna technologies.
- Farré-Maduell, E. & Casals-Pascual, C., 2019. The origins of gut microbiome research in Europe: From Escherich to Nissle. *Human Microbiome Journal*, 14, p.100065.
- Faye, L. & Gomord, V., 2009. *Recombinant Proteins From Plants Methods and Protocols*, New York: Humana Press.
- Fenech, M., 2002. Micronutrients and genomic stability: a new paradigm for recommended dietary allowances (RDAs). *Food and Chemical Toxicology*, 40(8), pp.1113–1117.
- Fiévet, C., 2012. *Body hacking: pirater son corps et redéfinir l'humain*, FYP éditions.
- Finetto, C., Lobascio, C. & Rapisarda, A., 2010. Concept of a Lunar FARM Food and revitalization module. *Acta Astronautica*, 66(9-10), pp.1329–1340.
- Fitts, R.H. et al., 2013. Effects of prolonged space flight on human skeletal muscle enzyme and substrate profiles. *Journal of Applied Physiology*, 115(5), pp.667–679.
- Fogg, M.J., 1995. *Terraforming: Engineering Planetary Environments*, Warrendale, PA: SAE International.
- Fogg, M.J., 2000. The ethical dimensions of space settlement. *Space Policy*, 16(3), pp.205–211.
- Folke, C. et al., 2004. Regime Shifts, Resilience, and Biodiversity in Ecosystem Management. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 35(1), pp.557–581.
- Frosch, R.A. & Gallopoulos, N.E., 1989a. Des stratégies industrielles viables. *Pour la science*, (145), pp.106–115.
- Frosch, R.A. & Gallopoulos, N.E., 1989b. Strategies for manufacturing. *Scientific American*, 261(3), pp.144–152.

- Frost, L.S.L. et al., 2005. Mobile genetic elements: the agents of open source evolution. *Nature Reviews Microbiology*, 3(9), pp.722–732.
- Fulget, N. et al., 1999. MELISSA: global control strategy of the artificial ecosystem by using first principles models of the compartments. *Advances in Space Research*, 24(3), pp.397–405.
- Fuller, R.B., 1969. *Operating manual for spaceship earth*, Touchstone.
- Gadenne, E., 2012. *Guide pratique du Quantified Self. Mieux gérer sa vie, sa santé, sa productivité*, FYP éditions.
- Ganzer, B. & Messerschmid, E., 2009. Integration of an algal photobioreactor into an environmental control and life support system of a space station. *Acta Astronautica*, 65(1-2), pp.248–261.
- Garland, J.L., 2007. Microbial functions in space: Mars transit to early planetary base exploration missions. *Acta Astronautica*, 60(4-7), pp.518–524.
- Gartner, E.M. & Macphee, D.E., 2011. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. *Cement and Concrete Research*, 41(7), pp.736–749.
- Gasser, S.M., 2009. The Shape of Heredity. *The Scientist*, 23(7).
- Geiman, T.M. & Muegge, K., 2009. DNA methylation in early development. *Molecular Reproduction and Development*, pp.n/a–n/a.
- Gershon, D., 1997. Bioinformatics in a post-genomics age : Abstract : Nature. *Nature*, 389(6649), pp.417–418.
- Gewin, V., 2012. Microbes en masse: The sequencing machine. *Nature News*, 487(7406), pp.156–158.
- Ghosh, D., Skinner, M.A. & Laing, W.A., 2007. Pharmacogenomics and nutrigenomics: synergies and differences. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(5), pp.567–574.
- Gibney, E., 2016. Europe plans giant billion-euro quantum technologies project. *Nature News*, 532(7600), p.426.
- Gitelson, I.I. et al., 1989. Long-term experiments on man's stay in biological life-support system. *Advances in space research*, 9(8), pp.65–71.
- Gitelson, J.I., Lisovsky, G.M. & Macelroy, R.D., 2004. *Man-Made Closed Ecological Systems*, CRC Press.
- Godia, F. et al., 2002. MELISSA: a loop of interconnected bioreactors to develop life support in space. *Journal of Biotechnology*, 99(3), pp.319–330.
- Godia, F. et al., 2004. The MELISSA pilot plant facility as an integration test-bed for advanced life support systems. *Advances in Space Research*, 34(7), pp.1483–1493.
- Gogarten, J.P. & Townsend, J.P., 2005. Horizontal gene transfer, genome innovation and evolution. *Nature Reviews Microbiology*, 3(9), pp.679–687.
- Goldenfeld, N. & Woese Carl, 2007. Biology's next revolution. *Nature*, 445(7126), pp.369–369.
- Gonzales, J.M., Jr., 2009. Aquaculture in bio-regenerative life support systems (BLSS): Considerations. *Advances in Space Research*, 43(8), pp.1250–1255.

- Graedel, T.E., 1996. On the concept of industrial ecology. *Annual Review of Energy and the Environment*, 21, pp.69–98.
- Graham, T. et al., 2019. Early seedling response of six candidate crop species to increasing levels of blue light. *Life Sciences in Space Research*, 21, pp.40–48.
- Grayson, M., 2010. Nutrigenomics. *Nature*, 468(7327), pp.S1–S1.
- Grigoriev, A.I. et al., 2010. Regeneration of water at space stations. *Acta Astronautica*, pp.1–7.
- Gripenland, J. et al., 2010. RNAs: regulators of bacterial virulence. *Nature Reviews Microbiology*, 8(12), pp.857–866.
- Gros, J.B.J. et al., 2002. Recycling efficiencies of C, H, O, N, S, and P elements in a Biological Life Support System based on microorganisms and higher plants. *Advances in Space Research*, 31(1), pp.195–199.
- Grosse, F., 2010. Le découplage croissance / matières premières. De l'«économie circulaire à l'économie de la fonctionnalité : vertus et limites du recyclage*. *Futuribles*, (365), pp.99–124.
- Gruber, P. & Imhof, B., 2007. Transformation: Structure/space studies in bionics and space design. *Acta Astronautica*, 60(4-7), pp.561–570.
- Guillaud, H., 2012. *De la mesure à la démesure de soi: Quand mes données disent qui je suis*, publie.net.
- Guillaud, H., 2011. *Un monde de données: comprendre l'implication sociale et politique des banques de données et leur accès*, publie.net.
- Guo, S. et al., 2008. Development of an improved ground-based prototype of space plant-growing facility. *Advances in Space Research*, 41(5), pp.736–741.
- Gurevich, Y.L. et al., 2008. The carbon cycle in a bioregenerative life support system with a soil-like substrate. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.1043–1048.
- Güell, M. et al., 2011. Bacterial transcriptomics: what is beyond the RNA hori-zome? *Nature Reviews Microbiology*, 9(9), pp.658–669.
- Hacker, J.O.R. & Carniel, E., 2001. Ecological fitness, genomic islands and bacterial pathogenicity. *EMBO reports*, 2(5), pp.376–381.
- Haidegger, T. & Benyo, Z., 2008. Surgical robotic support for long duration space missions. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.996–1005.
- Haidegger, T. et al., 2012. Simulation and control for telerobots in space medicine. *Acta Astronautica*, 81(1), pp.390–402.
- Haider, O. & Groemer, G., 2014. Space Tweetup – from a participant to a Mars Tweetup organizer and a new format of space communication. *Acta Astronautica*, 94(1), pp.215–221.
- Hao, Z. et al., 2012. Possible nutrient limiting factor in long term operation of closed aquatic ecosystem. *Advances in space research*, 49(5), pp.841–849.
- Harrison, A.A., 2009. Humanizing outer space architecture, habitability, and behavioral health. *Acta Astronautica*, pp.1–7.

- Haynes, R., 1990. Ecce copoiesis: Playing God on Mars. In M. D, ed. *Moral expertise*. New York: Routledge, pp. 161–183.
- Haynes, R., 1993. How Might Mars Become a Home for Humans? *users.globalnet.co.uk*. Available at: <http://www.users.globalnet.co.uk/~mfogg/haynes.htm> [Accessed May 17, 2013].
- Häuplik-Meusburger, S. et al., 2014. Greenhouses and their humanizing synergies. *Acta Astronautica*, 96, pp.138–150.
- Häuplik-Meusburger, S., Peldszus, R. & Holzgethan, V., 2010. Greenhouse design integration benefits for extended spaceflight. *Acta Astronautica*, pp.1–6.
- Heberer, T., 2002. Occurrence, fate, and removal of pharmaceutical residues in the aquatic environment: a review of recent research data. *Toxicology letters*, 131(1-2), pp.5–17.
- Heinstein, P., Ballif, C. & Perret-Aebi, L.-E., 2013. Building Integrated Photovoltaics (BIPV): Review, Potentials, Barriers and Myths. *Green*, 3(2), pp.125–156.
- Hendrickx, L. & Mergeay, M., 2007. From the deep sea to the stars: human life support through minimal communities. *Current Opinion in Microbiology*, 10(3), pp.231–237.
- Hendrickx, L. et al., 2006. Microbial ecology of the closed artificial ecosystem MELiSSA (Micro-Ecological Life Support System Alternative): Reinventing and compartmentalizing the Earth's food and oxygen regeneration system for long-haul space exploration missions. *Research in Microbiology*, 157(1), pp.77–86.
- Henninger, D.L., TRI, T.O. & Packham, N.J.C., 1996. NASA's advanced life support systems human-rated test facility. *Advances in Space Research*, 18(1-2), pp.223–232.
- Hervé, C., Ricour, C. & Tauber, M., 2009. *L'obésité de l'enfant : éthique et déterminants*, Editions L'Harmattan.
- Hesketh, J., 2012. Personalised nutrition: how far has nutrigenomics progressed? *European Journal of Clinical Nutrition*, 67(5), pp.430–435.
- Hill, K., 2009. Genetic Testing in the Employment Application Process. *Senior Honors Theses*, (125), pp.1–32. Available at: <http://commons.emich.edu/honors/125>.
- Ho, M.-W. & Ulanowicz, R., 2005. Sustainable systems as organisms? *Biosystems*, 82(1), pp.39–51.
- Holling, C.S., 1986. Resilience of ecosystems; local surprise and global change. In W. C. Clark & R. E. Munn, eds. *Sustainable development of the biosphere*. Cambridge: Cambridge University Press, pp. 292–317.
- Holling, C.S., 2001. Understanding the Complexity of Economic, Ecological, and Social Systems. *Ecosystems*, 4(5), pp.390–405.
- Holling, C.S., Gunderson, L.H. & Ludwig, D., 2002. In search of a theory of adaptive change. In *Panarchy - understanding transformations in human and natural systems*. Washington: Island Press, pp. 3–24.
- Holt, R.D., 2006. Ecology: Asymmetry and stability. *Nature*, 442(7100), pp.252–253.
- Hood, L. & Flores, M., 2012. A personal view on systems medicine and the emergence of proactive P4 medicine: predictive, preventive, personalized and participatory. *New Biotechnology*, 29(6), pp.613–624.

- Hood, L. & Friend, S.H., 2011. Predictive, personalized, preventive, participatory (P4) cancer medicine. 8(3), pp.184–187.
- Horneck, G., 2008. The microbial case for Mars and its implication for human expeditions to Mars. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.1015–1024.
- Horneck, G. et al., 2016. AstRoMap European Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 16(3), pp.201–243.
- Horneck, G. et al., 2006. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part II: Missions to Mars. *Advances in Space Research*, 38(4), pp.752–759.
- Horneck, G.G. et al., 2002. HUMEX, a study on the survivability and adaptation of humans to long-duration exploratory missions, part I: lunar missions. *Advances in Space Research*, 31(11), pp.2389–2401.
- Hölldobler, B., Wilson, E. O. & Nelson, M. C., 2009. *The Superorganism: The Beauty, Elegance, and Strangeness of Insect Societies*. WW Norton & Co.
- Hu, D. et al., 2012. Construction of closed integrative system for gases robust stabilization employing microalgae peculiarity and computer experiment. *Ecological Engineering*, 44, pp.78–87.
- Hu, E. & Liu, H., 2010. Conceptual design of a bioregenerative life support system containing crops and silkworms. *Advances in Space Research*, 45(7), pp.929–939.
- Hublitz, I. et al., 2004. Engineering concepts for inflatable Mars surface greenhouses. *Advances in Space Research*, 34(7), pp.1546–1551.
- Human Genome Sequencing Consortium, I., 2004. Finishing the euchromatic sequence of the human genome. *Nature*, 431(7011), pp.931–945.
- Hunter, J. et al., 1998. *Diet Design and Food Processing for Bioregenerative Life Support Systems 0* ed., Warrendale, PA: SAE International.
- Hunter, P. et al., 2013. A vision and strategy for the virtual physiological human: 2012 update. *Interface Focus*, 3(2), pp.20130004–20130004.
- Hunter, P.J. & Borg, T.K., 2003. Integration from proteins to organs: the Physiome Project. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 4(3), pp.237–243.
- Hwang, H.T. et al., 2008. A membrane-based reactive separation system for CO₂ removal in a life support system. *Journal of Membrane Science*, 315(1-2), pp.116–124.
- Ihata, O., Kayaki, Y. & Ikariya, T., 2005. Aliphatic poly(urethane-amine)s synthesized by copolymerization of aziridines and supercritical carbon dioxide. *Macromolecules*, 38(15), pp.6429–6434.
- Ilgrande, C. et al., 2019. Media Optimization, Strain Compatibility, and Low-Shear Modeled Microgravity Exposure of Synthetic Microbial Communities for Urine Nitrification in Regenerative Life-Support Systems. *Astrobiology*, 19(11), pp.1353–1362.
- Ilgrande, C. et al., 2018. Metabolic and Proteomic Responses to Salinity in Synthetic Nitrifying Communities of *Nitrosomonas* spp. and *Nitrobacter* spp. *Frontiers in microbiology*, 9, p.2914.

- Imhof, B., 2007. [Interior] Configuration options, habitability and architectural aspects of the transfer habitat module (THM) and the surface habitat on Mars (SHM)/ESA's AURORA human mission to Mars (HMM) study. *Acta Astronautica*, 60(4-7), pp.571–587.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2008. Climate change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the fourth assessment report.
- Jager, T. et al., 2013. Dynamic energy budgets in population ecotoxicology: Applications and outlook. *Ecological modelling*.
- James, J.T., 2008. *Spacecraft Maximum Allowable Concentrations for Airborne Contaminants*, National Aeronautics and Space Administration.
- Jirtle, R.L. & Skinner, M.K., 2007. Environmental epigenomics and disease susceptibility. *Nature Reviews Genetics*, 8(4), pp.253–262.
- Jones, C.G., Lawton, J.H. & Shachak, M., 1994. Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), pp.373–386.
- Joshi-Tope, G., 2004. Reactome: a knowledgebase of biological pathways. *Nucleic Acids Research*, 33(Database issue), pp.D428–D432.
- Jourdan, J.P., 2018. *Manuel de culture artisanale de spiruline*,
- Jumpstart Consortium Human Microbiome Project Data Generation Working Group, 2012. Evaluation of 16S rDNA-Based Community Profiling for Human Microbiome Research J. Ravel, ed. *PLoS ONE*, 7(6), p.e39315.
- Kading, B. & Straub, J., 2015. Utilizing in-situ resources and 3D printing structures for a manned Mars mission. *Acta Astronautica*, 107, pp.317–326.
- Kahn, J., Liverman, C.T. & McCoy, M.A., 2014. *Health Standards for Long Duration and Exploration Spaceflight: Ethics Principles, Responsibilities, and Decision Framework*, The National Academies Press.
- Kanas, N., 2010. From Earth's orbit to the outer planets and beyond Psychological issues in space. *Acta Astronautica*, pp.1–6.
- Kanas, N., 2014. Psychosocial issues during an expedition to Mars. *Acta Astronautica*, 103, pp.73–80.
- Kanas, N. & Manzey, D., 2008. *Space Psychology and Psychiatry*, Springer Science & Business Media.
- Kanas, N. et al., 2001. Human interactions in space: Results from Shuttle/Mir. *Acta Astronautica*, 49(3-10), pp.243–260.
- Kaput, J., 2008. Nutrigenomics research for personalized nutrition and medicine☆. *Current Opinion in Biotechnology*, 19(2), pp.110–120.
- Kartal, B. et al., 2012. Molecular mechanism of anaerobic ammonium oxidation. *Nature*, 479(7371), pp.127–130.
- Keith, D., Ha-Duong, M. & Stolaroff, J., 2006. Climate Strategy with CO₂ Capture from the Air. *Climatic Change*, 74(1), pp.17–45.
- Keith, D.W., 2009. Why Capture CO₂ from the Atmosphere? *Science*, 325(5948), pp.1654–1655.

- Kennedy, K.J., 2002. Lessons from TransHab. an architect experience. In AIAA Space Architecture Symposium - AIAA 2002-6105. NASA Johnson Space Center, Houston, Texas.
- Khetkorn, W. et al., 2017. Microalgal hydrogen production – A review. *Bioresource Technology*, 243, pp.1194–1206.
- King, D., 2004. The scientific impact of nations. *Nature*, 432(7013).
- Kiss, J.Z. et al., 2014. Changes in operational procedures to improve spaceflight experiments in plant biology in the European Modular Cultivation System. *Advances in Space Research*, 53(5), pp.818–827.
- Kitano, H., 2002. Computational systems biology. *Nature*, 420(6912), pp.206–210.
- Klanjscek, T. & Legovic, T., 2001. Toward a closed life support system for interplanetary missions. *Ecological modelling*, 138(1-3), pp.41–54.
- Kliss, M. et al., 2003. Initial closed operation of the CELSS Test Facility Engineering Development Unit. *Advances in Space Research*, 31(1), pp.263–270.
- Kliss, M. et al., 2000. Recent advances in technologies required for a “Salad Machine.” *Advances in Space Research*, 26(2), pp.263–269.
- Koch, B. & Gerzer, R., 2011. Impact of :envihab on Future Research for Space and Earth Overall Strategy – Landmark Research – Guiding Recommendations – Key Messages. In 1st :envihab Symposium. Köln: DLR.
- Kooijman, S.A.L.M., 2009. *Dynamic Energy Budget Theory for Metabolic Organisation*, Cambridge University Press.
- Kopf-Bolanz, K.A. et al., 2012. Validation of an In Vitro Digestive System for Studying Macronutrient Decomposition in Humans. *Journal of Nutrition*, 142(2), pp.245–250.
- Kozicki, J. & Kozicka, J., 2011. Human friendly architectural design for a small Martian base. *Advances in Space Research*, 48(12), pp.1997–2004.
- Krome, K. et al., 2009. Soil bacteria and protozoa affect root branching via effects on the auxin and cytokinin balance in plants. *Plant and Soil*, 328(1-2), pp.191–201.
- Kussmann, M., Raymond, F. & Affolter, M., 2006. OMICS-driven biomarker discovery in nutrition and health. *Journal of Biotechnology*, 124(4), pp.758–787.
- La Torre, De, G.G. et al., 2012. Future perspectives on space psychology: Recommendations on psychosocial and neurobehavioural aspects of human spaceflight. *Acta Astronautica*, 81(2), pp.587–599.
- Lackner, K.S., 2009. Capture of carbon dioxide from ambient air. *European Physical Journal-Special Topics*, 176, pp.93–106.
- Lander, E.S. et al., 2001. Initial sequencing and analysis of the human genome. *Nature*, 409(6822), pp.860–921.
- Lane, H.W. & Feedback, D.L., 2002. History of nutrition in space flight: Overview. *Nutrition*, 18(10), pp.797–804.

- Langmead, B. et al., 2009. Ultrafast and memory-efficient alignment of short DNA sequences to the human genome. *Genome Biology*, 10(3), p.R25.
- Lapkin, A. & Constable, D., 2008. *Green Chemistry Metrics*, Wiley-Blackwell.
- Larsen, T.A. & Lienert, J., 2007. *Novaquatis final report. NoMix – A new approach to urban water management*, Duebendorf, Switzerland: EAWAG.
- Larsen, T.A., Udert, K.M. & Lienert, J., 2013. Source Separation and Decentralization for Wastewater Management. In IWA Publishing, p. 491.
- Lasseur, C., 2013. MELiSSA concept and compartments.
- Lasseur, C. et al., 2011. MELiSSA: THE EUROPEAN PROJECT OF CLOSED LIFE SUPPORT SYSTEM. *Gravitational and Space Biology*, 23(2).
- Lasseur, C.H.C. et al., 1995. MELISSA: a potential experiment for a precursor mission to the Moon. *Advances in Space Research*, 18(11), pp.111–117.
- Leach, N., 2014. 3D Printing in Space. *Architectural Design*, 84(6), pp.108–113.
- Lee, J.Z. et al., 2007. The effect of butyrate concentration on hydrogen production via photofermentation for use in a Martian habitat resource recovery process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(15), pp.3301–3307.
- Lee, S.-W. et al., 2011. CO₂ sequestration using principles of shell formation. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 89(3), pp.555–561.
- Lehto, K.M., Lehto, H.J. & Kanervo, E.A., 2006. Suitability of different photosynthetic organisms for an extraterrestrial biological life support system. *Research in Microbiology*, 157(1), pp.69–76.
- Lemay Lab, 2016. Farm follows fiction, a graphic novel. pp.1–24.
- Leplae, R., 2004. ACLAME: A CLAssification of Mobile genetic Elements. *Nucleic Acids Research*, 32(90001), pp.45D–49.
- Leuba, P. & Lyon, A.-C., 2012. Dossier de presse « InnoVaud » - Plate-forme de promotion de l'innovation dans le Canton de Vaud. *publidoc.vd.ch*.
- Levine, L.H., Kagie, H.R. & Garland, J.L., 2003. Biodegradation pathway of an anionic surfactant (IGEPON TC-42) during recycling waste water through plant hydroponics for advanced life support during long-duration space missions. *Advances in Space Research*, 31(1), pp.249–253.
- Levine, S.H., 2003. Comparing products and production in ecological and industrial systems. *Journal of Industrial Ecology*, 7(2), pp.33–42.
- Levine, S.H., 2000. Products and ecological models: A population ecology perspective. *Journal of Industrial Ecology*, 3(2-3), pp.47–62.
- Lévesque, B. et al., 2018. Impact of indoor air quality on respiratory health: results of a local survey on housing environment. *Public health*, 163, pp.76–79.
- Li, H. et al., 2009. The Sequence Alignment/Map format and SAMtools. *Bioinformatics*, 25(16), pp.2078–2079.

- Li, L., Zhao, Z. & Liu, H., 2013. Feasibility of feeding yellow mealworm (*Tenebrio molitor* L.) in bioregenerative life support systems as a source of animal protein for humans. *Acta Astronautica*, 92(1), pp.103–109.
- Lissens, G. et al., 2004. Advanced anaerobic bioconversion of lignocellulosic waste for bioregenerative life support following thermal water treatment and biodegradation by *Fibrobacter succinogenes*. *Biodegradation*, 15(3), pp.173–183.
- Liu, H. et al., 2008. A conceptual configuration of the lunar base bioregenerative life support system including soil-like substrate for growing plants. *Advances in Space Research*, 42(6), pp.1080–1088.
- Liwarska-Bizukojc, E. et al., 2009. The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 17(8), pp.732–741.
- Llorach, R. et al., 2009. An LC-MS-Based Metabolomics Approach for Exploring Urinary Metabolome Modifications after Cocoa Consumption. *Journal of Proteome Research*, 8(11), pp.5060–5068.
- Llordés, A. et al., 2013. Tunable near-infrared and visible-light transmittance in nanocrystal-in-glass composites. *Nature*, 500(7462), pp.323–326.
- Lofrano, G. & Brown, J., 2010. Wastewater management through the ages: A history of mankind. *Science of The Total Environment*, 408(22), pp.5254–5264.
- Logue, J.M. et al., 2011. Hazard assessment of chemical air contaminants measured in residences. *Indoor Air*, 21(2), pp.92–109.
- Lotka, A.J., 1922. Contribution to the energetics of evolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 8(6), p.147.
- Lotka, A.J., 1932. The growth of mixed populations: two species competing for a common food supply. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 22, pp.461–469.
- Ma, H., Williams, P.L. & Diamond, S.A., 2013. Ecotoxicity of manufactured ZnO nanoparticles – A review. *Environmental Pollution*, 172, pp.76–85.
- MacDowell, N. et al., 2010. An overview of CO₂ capture technologies. *Energy & Environmental Science*, 3(11), pp.1645–1669.
- Macelroy, R.D., Rummel, J.D. & Smernoff, D.T., 1987. Controlled Ecological Life Support System. Design, Development, and Use of a Ground-Based Plant Growth Module. In NASA Conference Publication 2479. p. 83.
- Maher, B., 2008. The case of the missing heritability. *Nature*, 456(7218), pp.18–21.
- Maiani, G. et al., 2009. Carotenoids: actual knowledge on food sources, intakes, stability and bioavailability and their protective role in humans. *Mol Nutr Food Res*, 53(- 1613-4133 (Electronic)), pp.T–ppublish.
- Manach, C. et al., 2009. The complex links between dietary phytochemicals and human health deciphered by metabolomics D. Schrenk, ed. *Mol Nutr Food Res*, 53(10), pp.1303–1315.
- Manukovsky, N.S. et al., 2005. Material balance and diet in bioregenerative life support systems: Connection with coefficient of closure. *Advances in Space Research*, 35(9), pp.1563–1569.

- Manzey, D., 2004. Human missions to Mars: new psychological challenges and research issues. *Acta Astronautica*, 55(3-9), pp.781–790.
- Martha RJ Clokie, A.D.M.A.V.L.S.H., 2011. Phages in nature. *Bacteriophage*, 1(1), pp.31–45.
- Martin, A. et al., 2012. Space medicine innovation and telehealth concept implementation for medical care during exploration-class missions. *Acta Astronautica*, 81(1), pp.30–33.
- Martínez, L.M.T., Kharissova, O.V. & Kharisov, B.I., 2017. *Handbook of Ecomaterials*, Springer.
- Mas, J.L., 2007. FIPES: Facility for Integrated Planetary Exploration Simulation. In SAE International, 37th International Conference on Environmental Systems (ICES), Chicago, Illinois. pp. 1–13.
- Massa, G.D. et al., 2008. Plant productivity in response to LED lighting. *HortScience*, 43(7), pp.1951–1956.
- Massa, G.D., Santini, J.B. & Mitchell, C.A., 2010. Minimizing energy utilization for growing strawberries during long-duration space habitation. *Advances in Space Research*, pp.1–9.
- Massard, G., Jaquat, O. & Zürcher, D., 2014. *International survey on eco-innovation parks. Learning from experiences on the spatial dimension of eco-innovation*, Bern: Federal Office for the Environment, ERA-NET ECO-INNOVERA.
- Matovic, J. & Jakšić, Z., 2011. Bionic (Nano) Membranes. In P. Gruber et al., eds. *Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 9–24.
- Mattox, E.M., Knox, J.C. & Bardot, D.M., 2013. Carbon dioxide removal system for closed loop atmosphere revitalization, candidate sorbents screening and test results. *Acta Astronautica*, 86, pp.39–46.
- Mayer, J.E., Pfeiffer, W.H. & Beyer, P., 2008. Biofortified crops to alleviate micronutrient malnutrition. *Current Opinion in Plant Biology*, 11(2), pp.166–170.
- McCarthy, M.I., 2010. Genomics, Type 2 Diabetes, and Obesity. *New England Journal of Medicine*, 363(24), pp.2339–2350.
- McGowan, P.O., Meaney, M.J. & Szyf, M., 2008. Diet and the epigenetic (re)programming of phenotypic differences in behavior. *Brain Research*, 1237, pp.12–24.
- McGuire, K.L. & Treseder, K.K., 2010. Microbial communities and their relevance for ecosystem models: Decomposition as a case study. *Soil Biology and Biochemistry*, 42(4), pp.529–535.
- McKay, C.P., Toon, O.B. & Kasting, J.F., 1991. Making Mars habitable. *Nature*, 352(6335), pp.489–496.
- Menni, C. et al., 2012. Targeted metabolomics profiles are strongly correlated with nutritional patterns in women. *Metabolomics*, 9(2), pp.506–514.
- Menon, V. & Rao, M., 2012. Trends in bioconversion of lignocellulose: Biofuels, platform chemicals & biorefinery concept. *Progress in Energy and Combustion Science*, 38(4), pp.522–550.
- Meurisse, A. & Carpenter, J., 2020. Past, present and future rationale for space resource utilisation. *Planetary and Space Science*, 182, p.104853.
- Mélo, M., 2012. *Le biomimétisme nous mène-t-il au développement durable ?* UNIL.

- Mihalcescu, I., Hsing, W. & Leibler, S., 2004. Resilient circadian oscillator revealed in individual cyanobacteria. *Nature*, 430(6995), pp.81–85.
- Mikkelsen, M., Jorgensen, M. & Krebs, F.C., 2010. The teraton challenge. A review of fixation and transformation of carbon dioxide. *Energy Environ. Sci.*, 3(1), pp.43–81.
- Milkov, A.V., 2004. Global estimates of hydrate-bound gas in marine sediments: how much is really out there? *Earth-Science Reviews*, 66(3-4), pp.183–197.
- Miller, I.J. et al., 2019. Real-time health monitoring through urine metabolomics. *npj Digital Medicine*, pp.1–9.
- Miniño, A.M., Murphy, S.L. & Xu, J., 2011. Deaths: final data for 2008. *National vital statistics ...*
- Mitchell, C. et al., 1996. Earth benefits of interdisciplinary CELSS-related research by the NSCORT in bioregenerative life support. *Advances in Space Research*, 18(4), pp.23–31.
- Molders, K. et al., 2012. Selection and hydroponic growth of potato cultivars for bioregenerative life support systems. *Advances in space research*, 50(1), pp.156–165.
- Monje, O. et al., 2003. Farming in space: Environmental and biophysical concerns. *Advances in Space Research*, 31, pp.151–167.
- Moore, C.L., 2010. Technology development for human exploration of Mars. *Acta Astronautica*, pp.1–6.
- Morasch, B., Bonvin, F. & Reiser, H., 2010. Occurrence and fate of micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, Switzerland. Part II: Micropollutant removal between wastewater and raw drinking water. *Environmental ...*
- Morawska, L. et al., 2013. Indoor aerosols: from personal exposure to risk assessment. *Indoor Air*, 23(6), pp.462–487.
- Moreira, L.M., Rocha, A. & Ribeiro, C., 2011. Nutritional evaluation of single-cell protein produced by *Spirulina platensis*. *African Journal of ...*
- Morin, E., 1994. Sur l'interdisciplinarité. *Bulletin Interactif du Centre International de Recherches et Études transdisciplinaires*, (2).
- Morist, A. et al., 2001. Recovery and treatment of *Spirulina platensis* cells cultured in a continuous photobioreactor to be used as food. *Process Biochemistry*, 37(5), pp.535–547.
- Morowitz, H. et al., 2005. Closure as a scientific concept and its application to ecosystem ecology and the science of the biosphere. *Advances in Space Research*, 36(7), pp.1305–1311.
- Moses, R.W. & Bushnell, D.M., 2017. *Frontier In-Situ Resource Utilization for Enabling Sustained Human Presence on Mars*, NASA/TM–2016-219182.
- Muegge, B.D. et al., 2011. Diet Drives Convergence in Gut Microbiome Functions Across Mammalian Phylogeny and Within Humans. *Science*, 332(6032), pp.970–974.
- Müller, M. & Kersten, S., 2003. Opinion: Nutrigenomics: goals and strategies. *Nature Reviews Genetics*, 4(4), pp.315–322.
- Muñoz, I., Milà i Canals, L. & Clift, R., 2008. Consider a Spherical Man. *Journal of Industrial Ecology*, 12(4), pp.521–538.

- Naeem, S.S., 2002. Biodiversity: biodiversity equals instability? *Nature*, 416(6876), pp.23–24.
- Nakajima, A. et al., 2000. Transparent Superhydrophobic Thin Films with Self-Cleaning Properties. *Langmuir*, 16(17), pp.7044–7047.
- Nakama, A., Funasaka, K. & Shimizu, M., 2007. Evaluation of estrogenic activity of organic biocides using ER-binding and YES assay. *Food and chemical toxicology : an international journal published for the British Industrial Biological Research Association*, 45(9), pp.1558–1564.
- Naser, M.Z. & Chehab, A.I., 2018. Materials and design concepts for space-resilient structures. *Progress in Aerospace Sciences*, 98, pp.74–90.
- Nasseri, A.T. et al., 2011. Single Cell Protein: Production and Process. *American Journal of Food Technology*, 6(2), pp.103–116.
- Nations Unies, Assemblée générale, Bureau des affaires spatiales, 2003. *Traités et Principes des Nations Unies Relatifs à l'Espace Extra-atmosphérique*, United Nations Publications.
- Neinhuis, C. & Barthlott, W., 1997. Characterization and Distribution of Water-repellent, Self-cleaning Plant Surfaces. *Annals of Botany*, 79(6), pp.11–11.
- Nelson, M. & Wolverton, B.C., 2011. Plants+soil/wetland microbes: Food crop systems that also clean air and water. *Advances in Space Research*, 47(4), pp.582–590.
- Nelson, M. et al., 2010. Closed Ecological Systems, Space Life Support and Biospherics. pp.517–565.
- Nelson, M. et al., 1993. Using a closed ecological system to study Earth's biosphere. *Bioscience*, 43(4), pp.225–236.
- Nelson, M., Dempster, W.F. & Allen, J.P., 2008. Integration of lessons from recent research for “Earth to Mars” life support systems. *Advances in Space Research*, 41(5), pp.675–683.
- Nelson, M., Dempster, W.F. & Allen, J.P., 2013. Key ecological challenges for closed systems facilities. *Advances in Space Research*, 52(1), pp.86–96.
- Nelson, M., Dempster, W.F. & Allen, J.P., 2009. The water cycle in closed ecological systems: Perspectives from the Biosphere 2 and Laboratory Biosphere systems. *Advances in Space Research*, 44(12), pp.1404–1412.
- Nembrini, J. & Lalanne, D., 2016. Quand la Machine devient Bâtiment: Quelle place en IHM pour l'Interaction Homme-Bâtiment? In ième conférence francophone sur l'Interaction Homme-Machine. Fribourg.
- Nielsen, K.M. & Townsend, J.P., 2004. Monitoring and modeling horizontal gene transfer. *Nature Biotechnology*, 22(9), pp.1110–1114.
- Nissani, M., 1995. Fruits, Salads, and Smoothies: A Working Definition of Interdisciplinarity. *Journal of Educational Thought*, (29), pp.119–126.
- Nitta, K., 1999. Basic design concept of Closed Ecology Experiment Facilities. *Advances in space research*, 24(3), pp.343–350.
- Nitta, K., 2001. The CEEF, closed ecosystem as a laboratory for determining the dynamics of radioactive isotopes. *Advances in space research*, 27(9), pp.1505–1512.

- Novère, N.L. et al., 2009. The Systems Biology Graphical Notation. *Nature Biotechnology*, 27(8), pp.735–741.
- Nussbaumer, A. et al., 2013. Building on planet Mars student project. In P. J. S. Cruz, ed. London: Structure and Architecture: Concepts, Application and Challenges, pp. 1411–1418.
- Octave, S. & Thomas, D., 2009. Biorefinery: Toward an industrial metabolism. *Biochimie*, 91(6), pp.659–664.
- Odum, E.P., 1969. The strategy of ecosystem development. *Science*, 164(3877), pp.262–270.
- Ody, A. et al., 2013. Global investigation of olivine on Mars: Insights into crust and mantle compositions. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 118(2), pp.234–262.
- Olf, H. et al., 2009. Parallel ecological networks in ecosystems. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 364(1524), pp.1755–1779.
- Ongaro, F., 2014. From space medicine to preventive and personalized health care on earth. *Acta Astronautica*, 104(1), pp.409–411.
- Oremland, R.S. & Culbertson, C.W., 1992. Importance of methane-oxidizing bacteria in the methane budget as revealed by the use of a specific inhibitor. *Nature*, 356(6368), pp.421–423.
- Oriach, C.S. et al., 2016. Food for thought: The role of nutrition in the microbiota-gut-brain axis. *Gut microbiota and nutrition: where are we now?*, 6, pp.25–38.
- Orlov, O., Belakovskiy, M. & Kusmaul, A., 2014. Potential markets for application of space medicine achievements. *Acta Astronautica*, 104(1), pp.412–418.
- Ornish, D. et al., 2008. Changes in prostate gene expression in men undergoing an intensive nutrition and lifestyle intervention. *PNAS*, 105(24), pp.8369–8374.
- Oungrinis, K.-A. et al., 2014. Intelligent spacecraft module. *Acta Astronautica*, 105(1), pp.242–253.
- Ovesná, J. et al., 2008. High throughput “omics” approaches to assess the effects of phytochemicals in human health studies. *British Journal of Nutrition*, 99(E-S1), pp.ES127–ES134.
- Paille, C. et al., 1999. Femme: a precursor ecosystem on the moon. *Advances in Space Research*, 23(11), pp.1857–1860.
- Paille, C. et al., 2000. FEMME: a precursor experiment for the evaluation of bioregenerative life support systems. *Planetary and Space Science*, 48(5), pp.515–521.
- Pastushkova, L.K. et al., 2012. Changes in urine protein composition in human organism during long term space flights. *Acta Astronautica*, 81(2), pp.430–434.
- Patti, G.J., Yanes, O. & Siuzdak, G., 2012. Innovation: Metabolomics: the apogee of the omics trilogy. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 13(4), pp.263–269.
- Payne, A.N., Chassard, C. & Lacroix, C., 2012. Gut microbial adaptation to dietary consumption of fructose, artificial sweeteners and sugar alcohols: implications for host-microbe interactions contributing to obesity. *Obesity Reviews*, 13(9), pp.799–809.
- Pechurkin, N.S. & Shirobokova, I.M., 2001. Closed artificial ecosystems as a means of ecosystem studies for earth and space needs. *Advances in Space Research*, 27(9), pp.1497–1504.

- Pechurkin, N.S. et al., 1996. The health of biological life support systems. *Advances in Space Research*, 18(12), pp.265–268.
- Pechurkin, N.S.N., 1998. Key factors in development of man-made and natural ecosystems. *Advances in Space Research*, 24(3), pp.377–381.
- Pellerin, J.F. et al., 2013. *Embarquement pour Mars: 20 défis à relever*, A2C Medias.
- Penn, L. et al., 2010. Assessment of dietary intake: NuGO symposium report. *Genes & nutrition*, 5(3), pp.205–213.
- Perazzolo, C. et al., 2010. Occurrence and fate of micropollutants in the Vidy Bay of Lake Geneva, Switzerland. Part I: priority list for environmental risk assessment of pharmaceuticals. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 29(8), pp.1649–1657.
- Peters, M. et al., 2011. Chemical technologies for exploiting and recycling carbon dioxide into the value chain. *ChemSusChem*, 4(9), pp.1216–1240.
- Pickering, A.D.A. & Sumpter, J.P.J., 2003. Comprehending endocrine disruptors in aquatic environments. *Environmental Science & Technology*, 37(17), pp.331A–336A.
- Pisman, T.I. et al., 1999. Experimental and mathematical models for small aqueous closed ecosystems with spatially separated components. *Advances in Space Research*, 24(3), pp.361–366.
- Pisman, T.I.T. et al., 1998. A mathematical model of “plants-microorganisms” interaction on complete mineral medium and under nitrogen limitation. *Advances in Space Research*, 24(3), pp.383–387.
- Pisman, T.I.T., Pechurkin, N.S.N. & Somova, L.A.L., 2000. Competition between links in “producer-consumer” trophic chains in an aquatic closed system with spatially separated components. *Advances in Space Research*, 27(9), pp.1599–1603.
- Polyakov, Y.S., Musaev, I. & Polyakov, S.V., 2010. Closed bioregenerative life support systems: Applicability to hot deserts. *Advances in Space Research*, 46(6), pp.775–786.
- Pool, D.H. et al., 2012. Acidic ionic liquid/water solution as both medium and proton source for electrocatalytic H₂ evolution by [Ni(P₂N₂)₂]²⁺ complexes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*.
- Poughon, L. et al., 2009. Simulation of the MELiSSA closed loop system as a tool to define its integration strategy. *Advances in Space Research*, 44(12), pp.1392–1403.
- Prokhorov, K.S., 2009. Life Support Systems Safety. In *Safety Design for Space Systems*. Safety Design for Space Systems. Burlington: Elsevier, pp. 185–224.
- PwC, 2016. *Capture the growth - The opportunities for new entrants in healthcare and wellbeing*, PricewaterhouseCoopers.
- Qin, J. et al., 2010. A human gut microbial gene catalogue established by metagenomic sequencing. *Nature*, 464(7285), pp.59–65.
- Qin, L. et al., 2008. Selection of candidate salad vegetables for controlled ecological life support system. *Advances in Space Research*, 41(5), pp.768–772.
- Quintens, R., Baatout, S. & Moreels, M., 2020. Assessment of Radiosensitivity and Biomonitoring of Exposure to Space Radiation. In *Stress Challenges and Immunity in Space*. Stress Challenges and

- Immunity in Space: From Mechanisms to Monitoring and Preventive Strategies. Cham: Springer, Cham, pp. 519–533.
- Raiff, B. et al., 2014. Laboratory Validation of Inertial Body Sensors to Detect Cigarette Smoking Arm Movements. *Electronics*, 3(1), pp.87–110.
- Rainer Fischer, S.S., 2004. *Molecular Farming: Plant-made Pharmaceuticals and Technical Proteins* 1st ed., Wiley-VCH.
- Ramadan, Q. et al., 2011. Nutrchip: an integrated microfluidic system for in vitro investigation of the immunomodulatory function of dairy products. *Proceedings of the 15th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Sciences (MicroTAS)*.
- Rapp, D., 2007. *Human missions to Mars : enabling technologies for exploring the red planet*, Springer.
- Rappaport, S.M. & Smith, M.T., 2010. Environment and Disease Risks. *Science*, 330(6003), pp.460–461.
- Rasmussen, L.G. et al., 2011. Assessment of dietary exposure related to dietary GI and fibre intake in a nutritional metabolomic study of human urine. *Genes & nutrition*, 7(2), pp.281–293.
- Ratola, N. et al., 2012. Occurrence of organic microcontaminants in the wastewater treatment process. A mini review. *Journal of Hazardous Materials*, 239-240, pp.1–18.
- Raup, D.D., 1991. Extinction: bad genes or bad luck? *New Scientist*, 131(1786), pp.46–49.
- Reddy, M.V., Nica, M. & Wilkes, K., 2012. Space tourism: Research recommendations for the future of the industry and perspectives of potential participants. *Tourism Management*, 33(5), pp.1093–1102.
- Reik, W., 2001. Epigenetic Reprogramming in Mammalian Development. *Science*, 293(5532), pp.1089–1093.
- Rhodes, D.R., 2004. Large-scale meta-analysis of cancer microarray data identifies common transcriptional profiles of neoplastic transformation and progression. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(25), pp.9309–9314.
- Rist, M.J., Wenzel, U. & Daniel, H., 2006. Nutrition and food science go genomic. *Trends in Biotechnology*, 24(4), pp.172–178.
- Rivas, C.S. et al., 2000. *Fungus on orbit demonstration (FOOD)*, ESA Internal study.
- Rosenberg, I.H., 2013. Nutrition and the biology of human ageing: Proceedings of the ninth nestle international nutrition symposium. *The journal of nutrition, health & aging*, 17(8), pp.706–706.
- Rosenthal, J. & Nocera, D.G., 2007. Role of Proton-Coupled Electron Transfer in O-O Bond Activation. *Accounts of Chemical Research*, 40(7), pp.543–553.
- Roten, von, R. & Frei, U., 2012. *ESA Council meeting at ministerial level*, State Secretariat for Education and Research SER - Swiss Space Office.
- Roux, M., 2007. *Biologie systémique : Standards et modèles*, Omniscience.
- Rummel, J.D. et al., 2002. COSPAR's planetary protection policy: A consolidated draft. *Advances in Space Research*, 30(6), pp.1567–1571.

- Sachdeva, N. et al., 2018. Embedding photosynthetic biorefineries with circular economies: Exploring the waste recycling potential of *Arthrospira* sp. to produce high quality by-products. *Bioresource Technology*, 268, pp.237–246.
- Salisbury, F.B.F. & Clark, M.A.M., 1995. Choosing plants to be grown in a Controlled Environment Life Support System (CELSS) based upon attractive vegetarian diets. *Life support & biosphere science : international journal of earth space*, 2(3-4), pp.169–179.
- Salotti, J.M. & Suhr, E., 2014. Manned missions to Mars: Minimizing risks of failure. *Acta Astronautica*, 93, pp.148–161.
- Salmela, A., Kokkonen, E., Kulmala, I., Veijalainen, A.-M., Van Houdt, R., Leys, N., et al. (2018). Production and characterization of bioaerosols for model validation in spacecraft environment. *Journal of Environmental Sciences*, 69, 227–238.
- Samson, J.E. et al., 2013. Revenge of the phages: defeating bacterial defences. *Nature Reviews Microbiology*, 11(10), pp.675–687.
- San Martín-Rodríguez, L. et al., 2005. The determinants of successful collaboration: A review of theoretical and empirical studies. *Journal of Interprofessional Care*, 19(s1), pp.132–147.
- Santaella, C. et al., Reproduire un écosystème pour évaluer l'impact des nanoparticules. *Biofutur*, 32(347), pp.46–49.
- Sanz, D. et al., 2013. Wireless sensor networks for planetary exploration: Experimental assessment of communication and deployment. *Advances in Space Research*, 52(6), pp.1029–1046.
- Savage, C.J.C., Tan, G.B.G. & Lasseur, C.C., 2001. ESA developments in life support technology: achievements and future priorities. *Acta Astronautica*, 49(3-10), pp.331–344.
- Scalbert, A. et al., 2009. Mass-spectrometry-based metabolomics: limitations and recommendations for future progress with particular focus on nutrition research. *Metabolomics*, 5(4), pp.435–458.
- Schloss, P.D. et al., 2009. Introducing mothur: Open-Source, Platform-Independent, Community-Supported Software for Describing and Comparing Microbial Communities. *Applied and Environmental Microbiology*, 75(23), pp.7537–7541.
- Schmidt, M.A. & Goodwin, T.J., 2013. Personalized medicine in human space flight: using Omics based analyses to develop individualized countermeasures that enhance astronaut safety and performance. *Metabolomics*, 9(6), pp.1134–1156.
- Schwartz, S.H., Hammer, B. & Wach, M., 2006. Les valeurs de base de la personne: Théorie, mesures et applications. *Revue française de sociologie*, 47(4), pp.929–968.
- Scott, S.A. et al., 2010. Biodiesel from algae: challenges and prospects. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), pp.277–286.
- Secretariat d'Etat à l'éducation et à la recherche, 2008. *Révision de la politique spatiale suisse*, Département fédéral de l'intérieur.
- Seedhouse, E., 2009. *Martian Outpost. The Challenges of Establishing a Human Settlement on Mars*, Praxis.
- Seedhouse, E., 2008. *Tourists in Space*,

- Segal, E. et al., 2004. A module map showing conditional activity of expression modules in cancer. *Nature Genetics*, 36(10), pp.1090–1098.
- Sheridan, C. et al., 2017. Microbial Community Dynamics and Response to Plant Growth-Promoting Microorganisms in the Rhizosphere of Four Common Food Crops Cultivated in Hydroponics. *Microbial Ecology*, pp.1–16.
- Shiffman, S., 2014. Conceptualizing analyses of ecological momentary assessment data. *Nicotine & tobacco research : official journal of the Society for Research on Nicotine and Tobacco*, 16 Suppl 2(Suppl 2), pp.S76–87.
- Shiffman, S., Stone, A.A. & Hufford, M.R., 2008. Ecological momentary assessment. *Annual review of clinical psychology*, 4, pp.1–32.
- Shimoni, Y. et al., 2007. Regulation of gene expression by small non-coding RNAs: a quantitative view. *Molecular Systems Biology*, 3.
- Skoog, Å.I., 1984. BLSS: A contribution to future life support. *Advances in space research*, 4(12), pp.251–262.
- Slenzka, K., 2002. Life support for aquatic species - Past; Present; Future. *Advances in Space Research*, 30(4), pp.789–795.
- Smil, V., 2002. *The Earth's Biosphere: Evolution, Dynamics, and Change* 1st ed., The MIT Press.
- Smith, S.M., Zwart, S.R. & Heer, M., 2014. *Human Adaptation to Spaceflight: the Role of Nutrition*,
- Somova, L.A. & Pechurkin, N.S., 2005. Management and control of microbial populations' development in LSS of missions of different durations. *Advances in Space Research*, 35(9), pp.1621–1625.
- Somova, L.A., Pechurkin, N.S. & Huttenbach, R.C., 1996. Micro-and macroorganisms in life support systems (problem of coexistence). *Advances in Space Research*, 18(12), pp.259–263.
- Sonesson, U. et al., 2005. Industrial processing versus home cooking: An environmental comparison between three ways to prepare a meal. *AMBIO*, 34(4–5), pp.414–421.
- Sonnenberg, A., Baars, J. & Hendrickx, P., 2007. *IEA Bioenergy Task 42 Biorefinery*,
- Sridhar, K.R., Finn, J.E. & Kliss, M.H., 2000. In-situ resource utilization technologies for Mars life support systems. *Advances in Space Research*, 25(2), pp.249–255.
- Stamper, D.M.D. et al., 2002. *Ralstonia basilensis* M91-3, a denitrifying soil bacterium capable of using s-triazines as nitrogen sources. *Canadian Journal of Microbiology/Revue Canadienne de Microbiologie*, 48(12), pp.1089–1098.
- State Secretariat for Education, Research and Innovation SERISwiss Space Office SSO eds., 2014. *Swiss Space Implementation Plan*,
- Sterner, R.W. & Elser, J.J., 2002. *Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere*, Princeton University Press.
- Stimson Wilcox, R. & Stefano, J., 1991. Vibratory signals enhance mate-guarding in a water strider (Hemiptera: Gerridae). *Journal of Insect Behavior*, 4(1), pp.43–50.

- Stocker, T.F., Dahe, Q. & Plattner, G.K., 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*, Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Stokstad, E., 2005. Taking the Pulse of Earth's Life-Support Systems. *Science*, 308(5718), pp.41–43.
- Strik, D.P.B.T.B. et al., 2011. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology*, 29(1), pp.41–49.
- Strobel, G.A. et al., 2008. The production of myco-diesel hydrocarbons and their derivatives by the endophytic fungus *Gliocladium roseum* (NRRL 50072). *Microbiology*, 154(11), pp.3319–3328.
- Stutte, G.W. & Wheeler, R.M., 1997. Accumulation and effect of volatile organic compounds in closed life support systems. *Advances in Space Research*, 20(10), pp.1913–1922.
- Sugihara, G. & Ye, H., 2009. Complex systems: Cooperative network dynamics. *Nature*, 458(7241), pp.979–980.
- Suomalainen, E., 2012. *Dynamic Modelling of Material Flows and Sustainable Resource Use*.
- Sutton, K.H., 2007. Considerations for the successful development and launch of personalised nutrigenomic foods. *Mutation Research/Fundamental and Molecular Mechanisms of Mutagenesis*, 622(1-2), pp.117–121.
- Sychev, V.N., Levinskikh, M.A. & Shepelev, Y.Y., 2003. The biological component of the life support system for a martian expedition. *Advances in Space Research*, 31(7), pp.1693–1698.
- TA-Swiss, 2018. *Tout sur soi : potentiels et risques de l'automesure numérique* F. P. L. des choix technologiques, ed.,
- Tafforin, C., 2013. The Mars-500 crew in daily life activities: An ethological study. *Acta Astronautica*, 91, pp.69–76.
- Tagkopoulos, I., Liu, Y.C. & Tavazoie, S., 2008. Predictive Behavior Within Microbial Genetic Networks. *Science*, 320(5881), pp.1313–1317.
- Tamponnet, C. et al., 1999. Water recovery in space. *ESA Bulletin*, 97(5), pp.56–60.
- Tavana, M., 2004. Intelligent flight support system (IFSS): a real-time intelligent decision support system for future manned spaceflight operations at Mission Control Center. *Advances in Engineering Software*, 35(5), pp.301–313.
- Taylor, R.L., 1998. Why Mars?—Even under the condition of critical factor constraint engineering technology may permit the establishment and maintenance of an inhabitable ecosystem on Mars. *Advances in Space Research*, 22(3), pp.421–432.
- Tews, J. et al., 2003. Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31(1), pp.79–92.
- Thanachareonkit, ScarteziniAndersen, 2005. Comparing daylighting performance assessment of buildings in scale models and test modules. *Solar Energy*, 79(2), pp.15–15.
- The ENCODE Project Consortium, 2007. Identification and analysis of functional elements in 1% of the human genome by the ENCODE pilot project. *Nature*, 447(7146), pp.799–816.
- The Human Microbiome Project Consortium, 2012. Structure, function and diversity of the healthy human microbiome. *Nature*, 486(7402), pp.207–214.

- Tikhomirov, A.A. et al., 2007. Biological life support systems for a Mars mission planetary base: Problems and prospects. *Advances in Space Research*, 40(11), pp.1741–1745.
- Tilman, D. et al., 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*, 418(6898), pp.671–677.
- Tito, D.A., Anderson, G. & Carrico, J.P., Jr, 2013. Feasibility Analysis for a Manned Mars Free-Return Mission in 2018. *IEEE Aerospace Conference Paper*.
- Toma, C. & Butera, F., 2009. Hidden Profiles and Concealed Information: Strategic Information Sharing and Use in Group Decision Making. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 35(6), pp.793–806.
- Tributsch, H. & Calvin, M., 1971. Electrochemistry of Excited Molecules: Photo-Electrochemical Reactions of Chlorophylls. *Photochemistry and Photobiology*.
- Trifonov, S.V., Morozov, Y.A. & Kozlova, T.A., 2019. Processing of household waste in the BTLSS using the wet combustion method. *Life Sciences in Space Research*, 21, pp.22–24.
- Unruh, G.C.G., 2008. The biosphere rules. *Harvard Business Review*, 86(2), pp.111–138.
- Ursin, H., Comet, B. & Soulez-Larivière, C., 1991. An attempt to determine the ideal psychological profiles for crews of long term space missions. *Advances in Space Research*, 12(1), pp.301–314.
- van Delden, C.C. et al., 2012. Azithromycin to prevent *Pseudomonas aeruginosa* ventilator-associated pneumonia by inhibition of quorum sensing: a randomized controlled trial. *Intensive Care Medicine*, 38(7), pp.1118–1125.
- Van Houdt, R. & Leys, N., 2020. Monitoring the Microbial Burden in Manned Space Stations. In A. Choukèr, ed. *Stress Challenges and Immunity in Space: From Mechanisms to Monitoring and Preventive Strategies*. Stress Challenges and Immunity in Space: From Mechanisms to Monitoring and Preventive Strategies. Cham: Springer International Publishing, pp. 463–475.
- van Loon, J. et al., 2007. The national — esa soyuz missions andromède, marco polo, odissea, cervantes, delta and eneide. *Microgravity - Science and Technology*, 19(5), pp.9–32.
- van Ommen, B. & Stierum, R., 2002. Nutrigenomics: exploiting systems biology in the nutrition and health arena. *Current Opinion in Biotechnology*, 13(5), pp.517–521.
- Vance, A., 2015. *Elon Musk: Tesla, SpaceX, and the quest for a fantastic future*, HarperCollinsPublishers.
- Vergères, G., 2010. Un voyage gastro-moléculaire à travers la nutriginomique. In Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux.
- Vergères, G. & Sagaya, F., 2007. *Nutrigénomique: science ou fiction?* Station de recherche Agroscope Liebefeld-Posieux.
- Verseux, C. et al., 2016. Sustainable life support on Mars – the potential roles of cyanobacteria. *International Journal of Astrobiology*, 15(1), pp.65–92.
- Vital Wave Consulting, 2009. *mHealth for Development*, Washington, D.C. and Berkshire, UK: UN Foundation -Vodafone Foundation Partnership.

- Vlaanderen, J. et al., 2010. Application of OMICS technologies in occupational and environmental health research; current status and projections. *Occupational and Environmental Medicine*, 67(2), pp.136–143.
- Vodovotz, Y., Bourland, C.T. & Rappole, C.L., 1997. Advanced Life Support Food Development: A New Challenge. *University of Houston* [http:// ...](http://...)
- Vogel, G., 2008. Upending the traditional farm. *Science*, 319(5864), pp.752–753.
- Voit, D.C., Santos, M.R. & Singh, R.P., 2006. Development of a multipurpose fruit and vegetable processor for a manned mission to Mars. *Journal of Food Engineering*, 77(2), pp.230–238.
- Volk, T., 1996. Considerations in miniaturizing simplified agro-ecosystems for advanced life support. *Ecological Engineering*, 6, pp.99–108.
- Volk, T. & Rummel, J.D., 1987. Mass balances for a biological life support system simulation model. *Advances in Space Research*, 7(4), pp.141–148.
- Wahli, W. & Constantin, N., 2011. *La nutriginomique dans votre assiette. Les gènes ont aussi leur part du gâteau...* 2011 ed., De Boeck.
- Wang, B. et al., 2021. Survival of desert algae *Chlorella* exposed to Mars-like near space environment. *Life Sciences in Space Research*, 29, pp.22–29.
- Wardekker, J.A. et al., 2010. Operationalising a resilience approach to adapting an urban delta to uncertain climate changes. *Technological Forecasting & Social Change*, 77(6), pp.987–998.
- Waterland, R.A. & Jirtle, R.L., 2003. Transposable Elements: Targets for Early Nutritional Effects on Epigenetic Gene Regulation. *Molecular and Cellular Biology*, 23(15), pp.5293–5300.
- Wells, P.E., 2005. Re-writing the ecological metaphor: Part 1. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 3(1-2), pp.114–128.
- Wells, P.E. & Darby, L., 2006. Re-writing the ecological metaphor, Part 2: the example of diversity. *Progress in Industrial Ecology, an International Journal*, 3(1), pp.129–147.
- Werfel, J., Petersen, K. & Nagpal, R., 2014. Designing Collective Behavior in a Termite-Inspired Robot Construction Team. *Science*.
- Wertz, J.-L. & Bédoué, O., 2013. *Lignocellulosic Biorefineries*, CRC Press.
- Westermann, B.B. et al., 2004. Shell growth and chamber formation of aquarium-reared *Nautilus pompilius* (Mollusca, Cephalopoda) by X-ray analysis. *Journal of Experimental Zoology Part A Comparative Experimental Biology*, 301(12), pp.930–937.
- Wheeler, R.M., 2017. Agriculture for Space: People and Places Paving the Way. *Open Agriculture*, 2(1), pp.1401–19.
- Wheeler, R.M., 2003. Carbon balance in bioregenerative life support systems: Some effects of system closure, waste management, and crop harvest index. *Advances in Space Research*, 31(1), pp.169–175.
- Wheeler, R.M. et al., 1996. Proximate composition of CELSS crops grown in NASA's biomass production chamber. *Advances in Space Research*, 18(4), pp.43–47.
- White, S.R. et al., 2001. Autonomic healing of polymer composites. *Nature*, 409(6822), pp.794–797.

- Whitman, W.B., Coleman, D.C. & Wiebe, W.J., 1998. Prokaryotes: the unseen majority. *PNAS*, 95(12), pp.6578–6583.
- Willing, B.P. et al., 2010. A Pyrosequencing Study in Twins Shows That Gastrointestinal Microbial Profiles Vary With Inflammatory Bowel Disease Phenotypes. *YGAST*, 139(6), pp.1844–1854.e1.
- Wilson, J.W. et al., 2007. Space flight alters bacterial gene expression and virulence and reveals a role for global regulator Hfq. *PNAS*, 104(41), pp.16299–16304.
- Wolff, S.A. et al., 2013. Plant mineral nutrition, gas exchange and photosynthesis in space: A review. *Advances in Space Research*, 51(3), pp.465–475.
- Wong, T.-S. et al., 2011. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity. *Nature*, 477(7365), pp.443–447.
- World Health Organization, 2011. *Report on the burden of endemic health care-associated infection worldwide*, World Health Organization.
- World Health Organization, 2010. Valeurs guides de l’OMS pour la qualité de l’air intérieur : le cas de plusieurs polluants.
- Xu, L., Geman, D. & Winslow, R.L., 2007. Large-scale integration of cancer microarray data identifies a robust common cancer signature. *BMC Bioinformatics*, 8(1), p.275.
- Yang, C. et al., 2008. Treating urine by *Spirulina platensis*. *Acta Astronautica*, 63(7-10), pp.1049–1054.
- Yang, X., Bentink, S. & Spang, R., 2005. Detecting Common Gene Expression Patterns in Multiple Cancer Outcome Entities. *Biomedical Microdevices*, 7(3), pp.247–251.
- Yang, Y. et al., 2009. Silkworms culture as a source of protein for humans in space. *Advances in Space Research*, 43(8), pp.1236–1242.
- Young, L.R. & Sutton, J.P., 2017. *Encyclopedia of Bioastronautics*, Springer.
- Yunze, S. & Shuangsheng, G., 2014. Effects of photoperiod on wheat growth, development and yield in CELSS. *Acta Astronautica*, 105(1), pp.24–29.
- Zabel, P. et al., 2016. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. pp.1–16.
- Zevenhoven, R., Fagerlund, J. & Songok, J.K., 2011. CO₂ mineral sequestration: developments toward large-scale application. *Greenhouse Gases: Science and Technology*, 1(1), pp.48–57.
- Zhang, L. et al., 2012. Exogenous plant MIR168a specifically targets mammalian LDLRAP1: evidence of cross-kingdom regulation by microRNA. *Cell Res*, 22(1), pp.107–126.
- Zhuang, X. et al., 2007. New advances in plant growth-promoting rhizobacteria for bioremediation. *Environment International*, 33(3), pp.406–413.
- Zubrin, R., 1998. *The Case for Mars: The Plan to Settle the Red Planet and Why We Must* 1st ed., Pocket Books.