



UNIL | Université de Lausanne

FACULTÉ DES GÉOSCIENCES ET DE L'ENVIRONNEMENT
INSTITUT DE POLITIQUES TERRITORIALES ET D'ENVIRONNEMENT HUMAIN

**Les symbioses industrielles :
une nouvelle stratégie pour l'amélioration de
l'utilisation des ressources matérielles et
énergétiques par les activités économiques**

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

par

Guillaume Massard

Directeur de thèse
Professeur Suren Erkman

Jury
Professeur Jean Rüegg, Président du jury
Professeur François Golay, Expert
Dr. Daniel Chambaz, Expert
Dr. Arnaud Ansart, Expert

LAUSANNE

2011



UNIL | Université de Lausanne

FACULTÉ DES GÉOSCIENCES ET DE L'ENVIRONNEMENT
INSTITUT DE POLITIQUES TERRITORIALES ET D'ENVIRONNEMENT HUMAIN

**Les symbioses industrielles :
une nouvelle stratégie pour l'amélioration de
l'utilisation des ressources matérielles et
énergétiques par les activités économiques**

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

par

Guillaume Massard

Directeur de thèse
Professeur Suren Erkman

Jury
Professeur Jean Rüegg, Président du jury
Professeur François Golay, Expert
Dr. Daniel Chambaz, Expert
Dr. Arnaud Ansart, Expert

LAUSANNE

2011



UNIL | Université de Lausanne
Faculté des géosciences et de l'environnement
bâtiment Amphipôle
CH-1015 Lausanne

IMPRIMATUR

Vu le rapport présenté par le jury d'examen, composé de

Président de la séance publique :	M. le Professeur Jean Rüegg
Président du colloque :	M. le Professeur Jean Rüegg
Directeur de thèse :	M. le Professeur Suren Erkman
Expert externe :	M. le Professeur François Golay
Expert externe :	M. le Docteur Daniel Chambaz
Expert externe :	M. le Docteur Arnaud Ansart

Le Doyen de la Faculté des géosciences et de l'environnement autorise l'impression de la thèse de

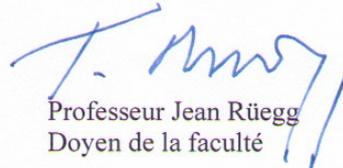
Monsieur Guillaume MASSARD

Master en Sciences et Ingénierie de l'environnement

intitulée

**"LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES : UNE NOUVELLE STRATEGIE
POUR L'AMELIORATION DE L'UTILISATION DES RESSOURCES
MATERIELLES ET ENERGETIQUES PAR LES ACTIVITES
ECONOMIQUES"**

Lausanne, le 25 mai 2011



Professeur Jean Rüegg
Doyen de la faculté



UNIL | Université de Lausanne

Unicentre

CH-1015 Lausanne

<http://serval.unil.ch>

Year : 2011

Les symbioses industrielles : une nouvelle stratégie pour l'amélioration de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques par les activités économiques

Massard Guillaume

Massard Guillaume, 2011, Les symbioses industrielles : une nouvelle stratégie pour l'amélioration de l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques par les activités économiques

Originally published at : Thesis, University of Lausanne

Posted at the University of Lausanne Open Archive.
<http://serval.unil.ch>

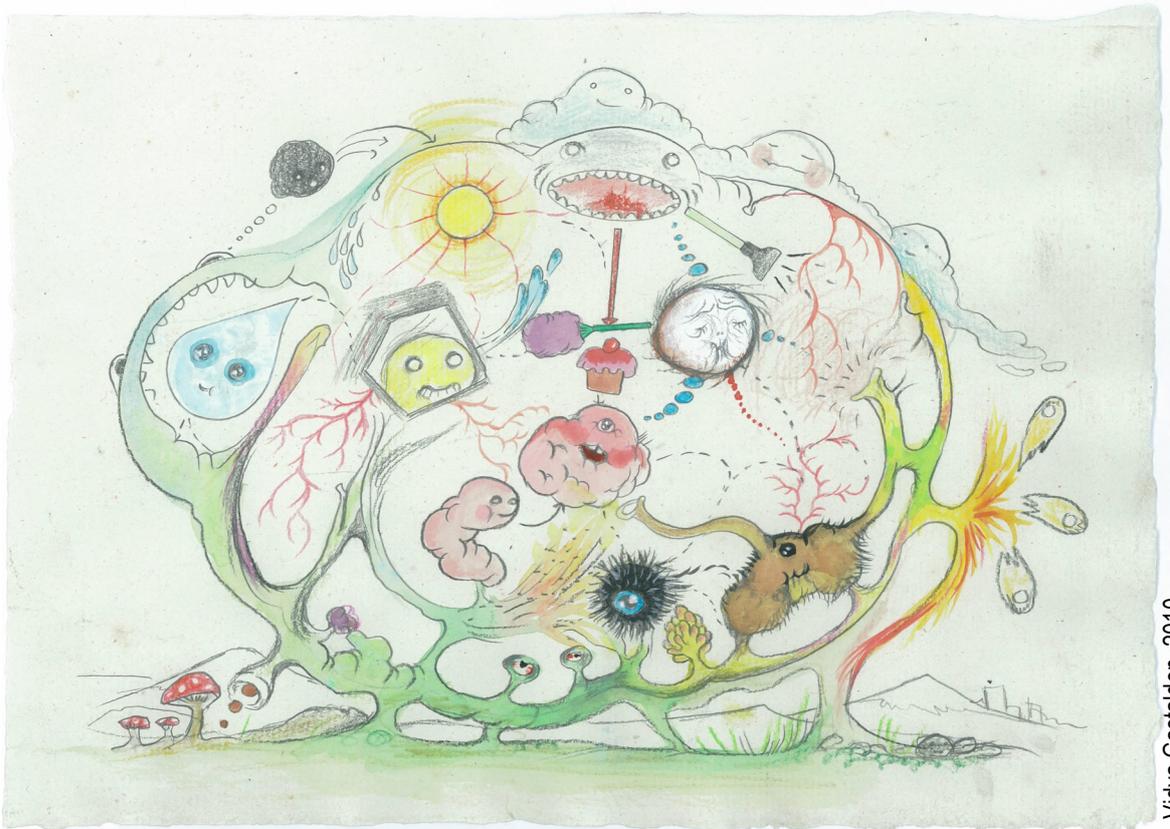
Droits d'auteur

L'Université de Lausanne attire expressément l'attention des utilisateurs sur le fait que tous les documents publiés dans l'Archive SERVAL sont protégés par le droit d'auteur, conformément à la loi fédérale sur le droit d'auteur et les droits voisins (LDA). A ce titre, il est indispensable d'obtenir le consentement préalable de l'auteur et/ou de l'éditeur avant toute utilisation d'une oeuvre ou d'une partie d'une oeuvre ne relevant pas d'une utilisation à des fins personnelles au sens de la LDA (art. 19, al. 1 lettre a). A défaut, tout contrevenant s'expose aux sanctions prévues par cette loi. Nous déclinons toute responsabilité en la matière.

Copyright

The University of Lausanne expressly draws the attention of users to the fact that all documents published in the SERVAL Archive are protected by copyright in accordance with federal law on copyright and similar rights (LDA). Accordingly it is indispensable to obtain prior consent from the author and/or publisher before any use of a work or part of a work for purposes other than personal use within the meaning of LDA (art. 19, para. 1 letter a). Failure to do so will expose offenders to the sanctions laid down by this law. We accept no liability in this respect.

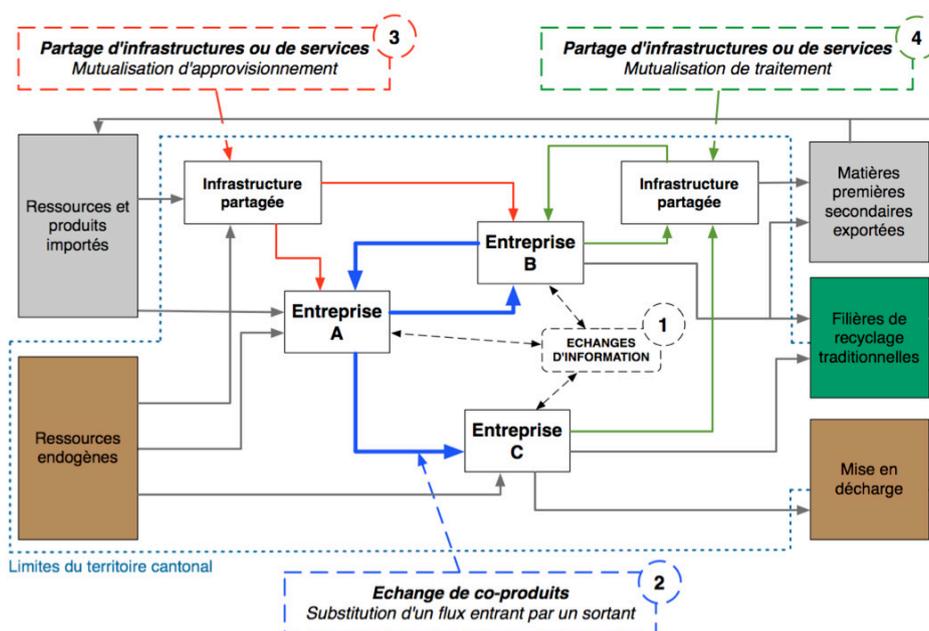
*A mes parents et mon frère,
A tous mes amis et collègues.*



Vidya Gastaldon, 2010

Résumé

Cette thèse traite d'un domaine d'application de l'écologie industrielle, les symbioses industrielles, comme stratégie d'amélioration de la consommation des ressources matérielles et énergétiques et de la gestion des déchets par les activités économiques. Les symbioses industrielles cherchent à créer de nouvelles collaborations directement entre les acteurs économiques d'un territoire dans le but d'échanger de l'information, des matières premières et des déchets, et d'intensifier les mutualisations de services et d'infrastructures possibles entre entreprises voisines. Ces quatre types de collaboration sont représentés schématiquement dans la figure ci-dessous.



Représentation des quatre différents types de symbioses industrielles (Figure 10, page 47)

Dans ce travail, la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles sont abordées sous plusieurs angles. Les recherches réalisées concernent le développement de procédures de mise en œuvre s'adressant aux collectivités publiques, aux institutions académiques et aux bureaux de conseil dans le domaine de l'environnement. Les objectifs des procédures sont de créer une dynamique de collaboration et de confiance entre les acteurs économiques et l'administration publique d'un territoire afin de détecter des symbioses industrielles potentielles. Ces procédures requièrent la gestion de grandes quantités d'informations relatives aux flux de matière et d'énergie.

Un travail de terrain, réalisé sur les territoires du canton de Genève et de Lausanne Région et utilisé comme études de cas, a permis de mettre en évidence un grand nombre de symbioses industrielles qui existent déjà en Suisse romande. Plusieurs dizaines d'exemples ont été identifiés principalement dans les

domaines de la gestion de l'eau, de l'énergie, des produits chimiques et des matériaux de construction. La législation suisse autoriserait cependant la concrétisation de nombreuses autres opportunités. Dans cette recherche, celles-ci sont évaluées techniquement, légalement, économiquement et environnementalement. La création d'un référentiel d'évaluation des opportunités permet de déterminer quelles sont les symbioses industrielles techniquement réalisables et pertinentes dans le contexte suisse et dans quels cas celles-ci représenteraient une réelle plus-value par rapport à l'utilisation actuelle de la ressource et aux filières existantes de collecte et de valorisation des déchets.

Finalement, un logiciel, SymbioGIS, destiné à soutenir la détection et l'évaluation de symbioses industrielles potentielles a été développé. Il s'agit d'une interface web accessible pour de nombreux utilisateurs, couplée à une interface de systèmes d'information géographique. En plus de la détection de symbioses industrielles, plusieurs fonctionnalités sont proposées pour faciliter la prise en compte des flux de matière et d'énergie dans les problématiques liées à l'aménagement du territoire et au positionnement des activités économiques.

En conclusion, cette recherche met en évidence la nécessité de rapprocher les institutions publiques en charge de la protection de l'environnement, de la promotion économique et de l'aménagement du territoire pour favoriser l'essor des symbioses industrielles comme stratégie pour la gestion des ressources matérielles et énergétiques. Elle propose des pistes pour intensifier les collaborations entre ces domaines et accélérer le partage des connaissances liées aux flux de matière et d'énergie et à leur cheminement au sein des activités économiques afin de rendre le système industriel existant en Suisse romande viable à long terme. Parallèlement, elle étudie les possibilités de transposer ces considérations et les procédures et outils développés dans le contexte économique et social de la région Asie-Pacifique, où se trouvent aujourd'hui de nombreuses activités de production.

Summary

Industrial symbioses: A new strategy for improving how economic activities use material and energy resources

This thesis focuses on one application of industrial ecology, industrial symbioses, as a strategy for improving how economic activities consume material and energy resources. Industrial symbioses seek to create new collaborations among economic players with the goal of exchanging information, raw materials, and waste directly among area businesses, and to step up the potential pooling of services and infrastructure among neighboring companies.

The identification and implementation of industrial symbioses are studied from several angles. The research first examines the development of implementation procedures for government bodies, academic institutions, and environmental consulting services. The purpose of the procedures is to create a dynamic of collaboration and trust between the economic players and the public officials in a region in order to identify potential industrial symbioses. The procedures necessitate managing large amounts of information about material and energy flows.

Fieldwork conducted in the canton of Geneva and the Lausanne region, and used as case studies for the research, highlights a great number of industrial symbioses that already exist in French-speaking Switzerland. Several dozen examples are identified, primarily in the areas of water management, energy, chemical products, and building materials; however, Swiss law would permit many others. The research evaluates these opportunities from a technical, legal, economic, and environmental standpoint. By developing an assessment framework it is possible to determine which industrial symbioses are technically feasible and pertinent in Switzerland, and under what circumstances they would represent real added value compared to the current use of the resource and to existing systems for collecting and reusing waste.

Lastly, SymbioGIS software was developed to help identify and assess potential industrial symbioses. The program's Web-based interface can be accessed by multiple users and is coupled with an interface that provides geographic information. In addition to identifying industrial symbioses, several program functionalities make it easier to consider material and energy flows with regard to local development issues and siting economic activities.

In conclusion, the research highlights the need to bring together public institutions charged with protecting the environment, promoting economic activity, and overseeing development in order to foster the expansion of industrial symbioses as a strategy for managing material and energy resources. It proposes solutions for stepping up collaboration among these players and accelerating the sharing of knowledge

about material and energy flows and their paths within economic activities with the goal of making the existing industrial system in French-speaking Switzerland viable long-term. Also examined were the possibilities of transposing these considerations and the study's findings about Switzerland to the economic and social context of the Asia-Pacific region, where much production is now located.

Remerciements

Mes premiers remerciements vont au Professeur Suren Erkman, qui m'a initié à l'écologie industrielle dès 2004 et m'a, au cours de ces cinq années de recherche, offert d'innombrables opportunités de découvrir ce concept passionnant et de me former à ses enjeux.

J'aimerais ensuite remercier de tout cœur mes parents, mon frère et toute ma famille, sans qui je ne serais jamais arrivé au terme de mes études et de cette recherche, ainsi que mes amis.

Je remercie tout particulièrement mes amis et collègues de l'Université de Lausanne, Jean Rüegg, Dominique Bourg, Pascale, Emilia, Tourane, Nelly, Leah, Joëlle, Verena, Théodore, Frédéric, Augustin, Gabriel, Philippe, Marc, Simon et Gérald. Un grand merci également à tous les étudiants, diplômants et civilistes qui ont de près ou de loin participé à cette recherche, Laetitia, Priti, Basile, Matthieu, Albin, Xavier, Baptiste, David et Rémy.

Les études de cas menées à Genève et à Lausanne ont constitué un apport important pour ma recherche. Pour leur soutien, j'aimerais remercier Daniel Chambaz, directeur général de l'Office de l'environnement de l'Etat de Genève et l'ensemble des membres du groupe de travail Ecosite, ainsi que Thierry Dewarrat, des Services industriels de Lausanne.

Pour leur lecture attentive et leur soutien précieux, je tiens également à remercier Carole Oppliger, Tourane Corbière, Françoise Spreter, Françoise Wallin, Maina Berrabah et Sébastien Bourquin.

Finalement, j'aimerais remercier toute l'équipe de Sofies : Ana, Charlotte, Benoit, David, Laurent et Frédéric ; ainsi que toutes les personnes qui travaillent dans le domaine de l'écologie industrielle et que j'ai eu la chance de côtoyer au cours de ces cinq années : Cyril Adoue, Ines Costa, Abhishek Agarwal, Gabriel Grant, Marian Chertow, Weslyne Ashton, Anthony Chui, pour m'avoir si bien accueilli aux Philippines, Frank Boons, Leo Baas, Ralph Isenmann, Shi Lei, Tsuyoshi Fujita, Geng Yong, Sabrina Brulot, Julia Steinberger, Marlyne Sahakian et bien d'autres.

Table des matières

CHAPITRE 1. L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES	23
1.1 REMARQUES PRELIMINAIRES : LES ENJEUX DE LA CONSOMMATION DE RESSOURCES.....	23
1.2 OBJECTIFS	26
1.3 L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE	26
1.3.1 LES METHODOLOGIES ET PROCEDURES DE L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE	30
1.4 LES SYNERGIES ET LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES	37
1.4.1 LES SYMBIOSES EN BIOLOGIE.....	37
1.4.2 LES SYNERGIES DANS L'ENTREPRISE.....	38
1.4.3 LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES AU SENS DE L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE.....	39
1.4.4 LES PARCS ECO-INDUSTRIELS.....	50
1.4.5 LE DEVELOPPEMENT ECO-INDUSTRIEL	51
1.4.6 LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES DANS LE MONDE	53
1.5 POSITIONNEMENT METHODOLOGIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE.....	60
1.5.1 AUTRES CONCEPTS ET PROCEDURES POUR AMELIORER L'EFFICACITE D'UN SYSTEME INDUSTRIEL 60	
1.5.2 OBJECTIFS ET QUESTIONS DE RECHERCHE	64
1.5.3 STRUCTURE DU DOCUMENT	67
1.6 PRESENTATION DES ETUDES DE CAS EN SUISSE ROMANDE	70
1.6.1 LE CONTEXTE ECONOMIQUE ET INDUSTRIEL SUISSE	70
1.6.2 CONSOMMATION DE RESSOURCES ET PRODUCTION DE DECHETS EN SUISSE.....	77
1.6.3 ETUDE DE CAS N°1 : LA REPUBLIQUE ET CANTON DE GENEVE	81
1.6.4 ETUDES DE CAS N°2 : LE CANTON DE VAUD ET LAUSANNE REGION	86
CHAPITRE 2. PROCEDURES DE DETECTION ET DE MISE EN ŒUVRE DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES SUR UN TERRITOIRE	91
2.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS.....	91
2.2 REVUE DE LITTERATURE.....	93
2.2.1 FACTEURS SOCIAUX ET TERRITORIAUX INFLUENÇANT LA MISE EN ŒUVRE DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES.....	93
2.2.2 PARAMETRES TECHNIQUES INFLUENÇANT LA FAISABILITE ET LA PERTINENCE D'UNE SYMBIOSE INDUSTRIELLE.....	104
2.3 METHODOLOGIE D'AUDIT DES ACTIVITES ECONOMIQUES.....	107

2.3.1	NOMENCLATURE DES FLUX DE MATIERE ET D'ENERGIE.....	109
2.3.2	DONNEES COLLECTEES AU COURS DE L'AUDIT	112
2.4	ANALYSE DE FAISABILITE ET DE PERTINENCE.....	118
2.4.1	LA FAISABILITE TECHNIQUE	119
2.4.2	LA FAISABILITE LEGALE.....	123
2.4.3	LA FAISABILITE ECONOMIQUE.....	131
2.4.4	LA PERTINENCE ENVIRONNEMENTALE.....	138
2.4.5	REFLEXIONS SUR LA FAISABILITE GLOBALE D'UNE SYMBIOSE INDUSTRIELLE.....	143
2.5	PROCEDURES POUR LA MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN	146
2.5.1	PROCEDURE 1 : CREATION D'UN RESEAU ET REALISATION D'AUDITS POUR LA DETECTION SYSTEMATIQUE ET LA MISE EN ŒUVRE DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES	147
2.5.2	PROCEDURE 2 : REALISATION D'ATELIERS THEMATIQUES POUR UNE APPROCHE RAPIDE ET CIBLEE	152
2.6	APPLICATION AUX PROJETS PILOTES DE GENEVE ET DE LAUSANNE REGION.....	157
2.6.1	ETUDE DE CAS DE GENEVE.....	157
2.6.2	ETUDE DE CAS DE LAUSANNE REGION.....	159
2.6.3	PERCEPTION DES POUVOIRS PUBLICS	160
2.6.4	PERCEPTION DES ENTITES ECONOMIQUES.....	164
2.7	DISCUSSION.....	169
2.7.1	PROPOSITIONS POUR LE DEVELOPPEMENT D'UNE TROISIEME PROCEDURE BASEE SUR LA REPRODUCTION DE BONNES PRATIQUES.....	172
2.7.2	CREATION D'UNE PLATEFORME ROMANDE SUR LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES.....	175
2.8	CONCLUSION	180
<u>CHAPITRE 3. CREATION D'UN OUTIL INTEGRANT LES SIG POUR LA DETECTION DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES</u>		183
3.1	INTRODUCTION ET REVUE DE LITTERATURE	183
3.1.1	LES SYSTEMES D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE ET L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE	183
3.1.2	HISTORIQUE DES SYSTEMES D'INFORMATION POUR LA DETECTION DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES.....	185
3.1.3	MOTIVATIONS POUR LA CREATION D'UN NOUVEAU LOGICIEL INTEGRANT LES SIG.....	191
3.2	LA BASE DE DONNEE ET SON INTERFACE DE GESTION SYMBIOGIS	195
3.2.1	CONTEXTE ET HISTORIQUE	195
3.2.2	DESCRIPTION DES FONCTIONNALITES ATTENDUES.....	195
3.2.3	CHOIX TECHNIQUES.....	197
3.2.4	INVENTAIRES DES DONNEES DISPONIBLES	200
3.2.5	CREATION DE LA BASE DE DONNEE	202

3.3	FONCTIONNALITES DE SYMBIOGIS	205
3.3.1	IMPORTATION, EXPORTATION ET MISE A JOUR DES DONNEES (F 1 – F 2).....	206
3.3.2	DETECTION DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES (F 3 - F 4)	209
3.3.3	VISUALISATION DES CORRESPONDANCES SUR L'INTERFACE CARTOGRAPHIQUE (F 6 - F 10).....	216
3.3.4	GESTION DES ENTREPRISES, IDENTIFICATION DES PUIITS ET SOURCES ET CREATION DE ZONES TAMPONS (F 6 - F 7 - F 10)	219
3.3.5	ELEMENTS POUR LA GESTION DE PROJETS (F 9)	226
3.4	LIMITES TECHNIQUES ACTUELLES ET PISTES D'AMELIORATIONS	227
3.5	DISCUSSION : LE POTENTIEL DE SYMBIOGIS POUR LA PLANIFICATION TERRITORIALE.....	233
3.6	CONCLUSION	239

CHAPITRE 4. IDENTIFICATION ET ANALYSE DE FAISABILITE DES SYMBIOSES

	<u>INDUSTRIELLES DANS LE CONTEXTE SUISSE</u>	<u>243</u>
4.1	INTRODUCTION.....	243
4.2	ETUDE DE CAS N°1 : GENEVE	249
4.2.1	SYMBIOSES INDUSTRIELLES PRE-EXISTANTES	252
4.2.2	SYMBIOSES INDUSTRIELLES POTENTIELLES	260
4.3	ETUDE DE CAS N°2 : LAUSANNE REGION.....	261
4.3.1	SYMBIOSES INDUSTRIELLES PRE-EXISTANTES	263
4.3.2	SYMBIOSES INDUSTRIELLES POTENTIELLES	265
4.4	ANALYSE DE LA FAISABILITE ET DE LA PERTINENCE DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES.....	266
4.4.1	LES INDICATEURS DANS LE DOMAINE DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DEVELOPPEMENT DURABLE 267	
4.4.2	FAMILLE N°1 : LE BOIS	270
4.4.3	FAMILLE N° 3 : LA CELLULOSE ET SES PRODUITS	277
4.4.4	FAMILLE N°4 : L'EAU	281
4.4.5	FAMILLE N°5 : LES ENCRE ET LES PIGMENTS	289
4.4.6	FAMILLE N°7 : LES HUILES ET LES GRAISSES	293
4.4.7	FAMILLE N°9 : LES MATERIAUX INERTES.....	298
4.4.8	FAMILLE N°11 : LES MATIERES ORGANIQUES	307
4.4.9	FAMILLE N°13 : LES OBJETS ET SUBSTANCES FONCTIONNELS.....	313
4.4.10	FAMILLE N°15 : LES PLASTIQUES ET LES CAOUTCHOUCS.....	318
4.4.11	FAMILLE N°16 : LES PRODUITS CHIMIQUES.....	322
4.4.12	FAMILLE N°18 : LES VECTEURS ENERGETIQUES ET MECANIQUES	331
4.4.13	LES MUTUALISATIONS DE COLLECTE ET D'APPROVISIONNEMENT	340
4.5	DISCUSSION.....	344
4.6	CONCLUSION	352

CHAPITRE 5. DISCUSSION ET CONCLUSION.....	353
5.1 INTRODUCTION.....	353
5.2 APPORTS POTENTIELS DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES AUX ACTIVITES ECONOMIQUES EN SUISSE	354
5.3 PROMOTION DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES ET SOUTIEN DES ENTREPRISES DANS LA MISE EN ŒUVRE	357
5.3.1 SYNTHÈSE DES ENJEUX DE LA DÉTECTION, ANALYSE ET MISE EN ŒUVRE DANS LES ENTREPRISES 357	
5.3.2 FAVORISER LE DÉVELOPPEMENT ECO-INDUSTRIEL EN SUISSE	360
5.4 PERSPECTIVES POUR ACCELERER LA TRANSITION VERS UN ECOSYSTEME INDUSTRIEL.....	369
5.5 TRANSPOSITION DES PROCEDURES ET OUTILS DEVELOPPES EN SUISSE DANS LE CONTEXTE ASIATIQUE.....	374
5.5.1 EVALUATION DES POSSIBILITES D'APPLICATION DES PROCEDURES ET OUTILS DANS LE CONTEXTE ASIE-PACIFIQUE	376
5.5.2 REFLEXION SUR LES POSSIBILITES DE SOUTIEN ET DE COLLABORATION POUR ACCELERER L'ESSOR DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES DANS LA REGION ASIE-PACIFIQUE.....	379
5.6 CONCLUSION	382
ANNEXE 1 : Liste des projets de symbioses industrielles en cours ou achevés dans le monde	404
ANNEXE 2 : Développement d'un système d'indicateurs pour évaluer la faisabilité et la pertinence d'une symbiose industrielle.....	407
ANNEXE 3 : Analyse détaillée des pistes détectées par SymbioGIS pour 12 activités économiques	415
ANNEXE 4 : Description des visites de terrains réalisées en Chine et aux Philippines	420
ANNEXE 5 : Perspectives de recherches appliquées	425

Table des abréviations

ACV = Analyse de cycle de vie

BCSD-UK = Business Council for Sustainable Development du Royaume-Uni

CCI = Chambre du commerce et de l'industrie

CREPE = Conférence romande des responsables de la protection de l'environnement

CRISP = Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners, UK

CSRP = Centre for Sustainable Resource Processing, Australie

DCB = Décharges contrôlées bioactives

DCMI = Décharges contrôlées pour matériaux inertes

DDC = Direction du développement et de la coopération, Suisse

DEU = Domestic Extraction Used

DMC = Domestic Material Consumption

DMI = Direct Material Input

DPO = Domestic Processed Output

EIP = Eco-Industrial Park

EMAS = Eco-Management and Auditing Scheme

EDF = Electricité de France

EPFL = Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

FER = Fédération des entreprises romandes

FTI = Fondation pour les terrains industriels, Genève

GESDEC = Service cantonal de géologie et de gestion des Déchets, Genève

GTZ = Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, Allemagne

HISP = Humber Industrial Symbiosis Programme, Royaume-Uni

ICAST = Institut pour la Communication et l'Analyse des Sciences et des Technologies, Genève

IS = Système d'information

ISIS = Industries et synergies inter-sectorielles

KIC = Kwinana Industry Council, Australie

KITECH = Korean Institute of Industrial Technology

KNPC = Korean National Cleaner Production Center

MEFA = Material and Energy Flow Analysis

MFA = Material Flow Analysis

NACE = Nomenclature statistique des activités économiques dans la Communauté européenne

NAS = Net Addition to Stock

NISP = National Industrial Symbiosis Program, Royaume-Uni

NOGA = Nomenclature générale des activités économiques, Suisse
NPR = Nouvelle politique régionale, Suisse
OCDE = Organisation de coopération et de développement économique
OCSTAT = Office cantonal de la statistique, Genève
OFEV = Office fédéral de l'environnement, Suisse
OFS = Office fédéral de la statistique, Suisse
PEZA = Philippines Economic Zone Authority
PIB = Produit intérieur brut
PMHS = Hydrure de polyméthylsiloxane
PNUE = Programme des Nations Unies pour l'environnement
PTB = Physical Trade Balance
RED IBIS = Regional Economic Development through Intelligence Based Industrial Symbiosis, UK
ScanE = Service cantonal de l'énergie, Genève
SECO = Secrétariat d'Etat à l'économie, Suisse
SELT = Service de l'économie, du logement et du tourisme, Vaud
SESA = Service des eaux, sols et assainissements, Vaud
SETA = State Environmental Protection Agency, Chine
SIL = Services industriels de Lausanne, Vaud
SI = Système d'information
SIG = Système d'information géographique
SITG = Système d'information du territoire genevois
SME = Système de management environnemental
STEP = Station d'épuration des eaux
TDO = Total Domestic Output
TEDA = Tianjin Economic Development Area, Chine
TIC = Technologies de l'information et de la communication
TMC = Total Material Consumption
TMO = Total Material Output
TMR = Total Material Requirement
UIOM = Usine d'incinération des ordures ménagères
ONUOI= Organisation des Nations Unies pour le développement industriel
UTT = Université de technologie de Troyes, France
US-EPA = United States Environmental Protection Agency
WBCSD = World Business Council for Sustainable Development
ZIPLO = Zone industrielle de Plan-les-Ouates, Genève

Table des figures

<i>Figure 1 : Production mondiale de pétrole entre 1984 et 2009. Source : (BP 2010).</i>	24
<i>Figure 2 : « Pic de Hubbert » pour les roches phosphatées. Source : (Cordell, Drangert et al. 2009).</i>	24
<i>Figure 3 : Proportions de métaux déjà extraits et encore disponibles sous forme de réserves. Source : (Halada 2008).</i>	25
<i>Figure 4 : Les trois types d'écosystèmes industriels. Source : (Lifset et Graedel 2002)</i>	29
<i>Figure 5 : Organisation et relation entre les méthodologies quantitatives et les procédures de mise en œuvre de l'écologie industrielle. Source : auteur.</i>	31
<i>Figure 6 : Les indicateurs de la comptabilité physique. Source : (Bringezu 2009).</i>	34
<i>Figure 7 : Le cycle de vie d'un produit. Source : (Graedel et Howard-Grenville 2005)</i>	35
<i>Figure 8 : Représentation des différents types de collaboration inter-entreprises pour la gestion des ressources en fonction des facteurs organisationnels, de risque, liés à leur potentiel et à leur efficacité. Source : (van Berkel, Bossilkov et al. 2006).</i>	43
<i>Figure 9 : Les différents types de symbioses industrielles en fonction de l'échelle géographique. Source : auteur</i>	45
<i>Figure 10 : Représentation des quatre types de symbioses industrielles considérés et leur influence sur le cheminement classique des flux de matière et d'énergie. Source : auteur, inspiré de (Adoue 2007).</i> ..	47
<i>Figure 11 : Schéma des flux de matière et d'énergie dans un procédé de production. Source : (Lambert 2001).</i>	50
<i>Figure 12 : Les trois phases du plan coréen de développement de parcs éco-industriels. Source : (KNCPC 2005).</i>	58
<i>Figure 13 : Hiérarchie des déchets. Source : auteur, à partir de (Kijak et Moy 2004) et (Peck 2003).</i> ... 61	
<i>Figure 14 : Interactions entre les différentes méthodologies d'optimisation d'un système industriel. Source : auteur.</i>	66
<i>Figure 15 : Evolution d'un écosystème industriel à travers les interactions entre les éléments qui le composent. Source : (Erkman 1998), modifié par l'auteur.</i>	71
<i>Figure 16 : Système d'unités administratives et statistiques suisse pour la description des activités économiques. Source : (OFS 2008)</i>	73
<i>Figure 17 : Les cinq forces influençant les entités économiques et définissant leur position sur un marché. Source : (Porter 1986).</i>	74
<i>Figure 18 : Modèle de comptabilité physique proposé par Eurostat appliqué à la Suisse pour 1990/2006. Les chiffres sont en tonnes par habitant et par année. Source : (Schmid 2008).</i>	79
<i>Figure 19 : Flux de sable et de gravier en 2006. Source : (Schmid 2008).</i>	79

<i>Figure 20 : Principales activités du secteur secondaire à Genève en termes de nombre d'emplois pour l'année 2005. Source : autour, selon OCSTAT, 2005.</i>	82
<i>Figure 21 : Le territoire du canton de Genève, l'emplacement des zones industrielles et la répartition des activités du secteur secondaire. Source : auteur, données SITG, 2008</i>	83
<i>Figure 22 : Historique et actions du groupe de travail Ecosite entre 1999 et 2010. Source : (Charrière, Niwa et al. 2008).</i>	84
<i>Figure 23 : Consommation de ressources à Genève en 2000. Source : (Faist, Frischknecht et al. 2003).</i>	85
<i>Figure 24 : Calendrier des travaux de terrain et des rapports réalisés pour l'action n°1, traitant de la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles à Genève. Source : auteur.</i>	86
<i>Figure 25 : Le territoire du canton de Vaud et détail de Lausanne Région, territoire du projet pilote utilisé comme étude de cas dans le canton de Vaud. Source : auteur, données UNIL.</i>	88
<i>Figure 26 : Calendrier des travaux de terrain et des rapports réalisés pour le projet pilote de Lausanne Région. Source : auteur.</i>	89
<i>Figure 27 : Etude de métabolisme des activités économiques sur le territoire de Lausanne Région en milliers de tonnes par an pour l'année 2005. Source : (Barthelemy 2008).</i>	89
<i>Figure 28 : Méthodologie pour l'identification et l'évaluation de nouvelles synergies régionales à Kwinana. Source : (van Beers, Bossilkov et al. 2005).</i>	103
<i>Figure 29 : Paramètres de faisabilité et de pertinence des symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	106
<i>Figure 30 : Représentation schématique du système industriel combinant le bilan de flux de matière et d'énergie et l'inventaire de cycle de vie. Source : adapté de (van Berkel, Willems et al. 1997).</i>	108
<i>Figure 31 : Cycle de vie d'un flux de matière utilisé par une entité économique et identification des informations utiles pour la détection et l'évaluation des symbioses industrielles dans le cas d'une entreprise du secteur secondaire. Source : auteur.</i>	116
<i>Figure 32 : Paramètres de faisabilité et de pertinence influençant la faisabilité globale des symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	118
<i>Figure 33 : Paramètres de l'indicateur de faisabilité technique des symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	120
<i>Figure 34 : Procédure d'autorisation pour l'échange de co-produits / sous-produits dans les cantons de Genève et Vaud. Source : auteur.</i>	130
<i>Figure 35 : Pertinence environnementale d'une filière de valorisation en fonction de l'efficacité du procédé (selon la hiérarchie des déchets) et de la compacité spatiale de la valorisation d'un flux. Source : auteur, selon (Bengoa 2007).</i>	143
<i>Figure 36 : Liens et dépendances entre les indicateurs de faisabilité technique, légale, économique et de pertinence environnementale. Source : auteur.</i>	144
<i>Figure 37 : Organigramme de projet présentant les neuf étapes de mise en œuvre de la procédure 1. Source : auteur.</i>	148

<i>Figure 38 : Organigramme de projet présentant les neuf étapes de la procédure 2. Source : auteur..</i>	<i>154</i>
<i>Figure 39 : Schéma des interactions entre un coordinateur de projet et une entité économique et en fonction du pouvoir d'influence dans les processus de décision. Source : auteur.....</i>	<i>166</i>
<i>Figure 40 : Organigramme de projet de la procédure 3 pour la détection de symbioses industrielles. Le coordinateur joue ici un rôle central proche de celui d'un consultant. Source : auteur.....</i>	<i>175</i>
<i>Figure 41 : Proposition d'architecture pour la création d'une interface d'optimisation de l'usage des ressources et de détection de symbioses industrielles intégrant les SIG. Source : auteur.....</i>	<i>198</i>
<i>Figure 42 : Le système client-serveur. Source : http://www.portalsig.org.....</i>	<i>199</i>
<i>Figure 43 : Schéma entité-relation étendu de la base de données SymbioGIS. Source : auteur et Basile Schaeli selon (Viquerat 2008).....</i>	<i>204</i>
<i>Figure 44 : SymbioGIS – Interface d'importation des données. Source : auteur.....</i>	<i>207</i>
<i>Figure 45 : Correspondances possible pour des substitutions. Source : auteur et Basile Schaeli.....</i>	<i>210</i>
<i>Figure 46 : Correspondances possibles pour des mutualisations de sorties. Source : auteur et Basile Schaeli.....</i>	<i>210</i>
<i>Figure 47 : SymbioGIS – Interface de visualisation de la table substitutions. Source : auteur.....</i>	<i>212</i>
<i>Figure 48 : SymbioGIS – Interface de visualisation des synergies de substitution intégrant les champs de recherche par entreprise et par code NOGA. Les appariements affichés correspondent aux 1000 résultats obtenus pour 12 entreprises du projet pilote de Genève. Source : auteur.....</i>	<i>218</i>
<i>Figure 49 : SymbioGIS – détection des entités économiques de collecte, valorisation et recyclage des déchets. Source : auteur.....</i>	<i>221</i>
<i>Figure 50 : SymbioGIS – visualisation simultanée des puits et des sources de chaleur de 12 entreprises du canton de Genève et des couches occupation du sol, bâtiments et serres agricoles. Source : auteur.....</i>	<i>222</i>
<i>Figure 51 : SymbioGIS – visualisation simultanée des puits d'eau potable de 12 entreprises du canton de Genève et des couches représentant les ressources d'eau souterraines et superficielles, ainsi que les eaux de surfaces exploitables. Source : auteur.....</i>	<i>223</i>
<i>Figure 52 : SymbioGIS – premiers éléments pour l'aide à la décision pour le positionnement de nouvelles activités en fonction d'autres éléments du territoire. Visualisation des puits et sources de produits chimiques en lien avec les zones de développement. Source : auteur.....</i>	<i>225</i>
<i>Figure 53 : Architecture du prototype SymbioGIS (selon Figure 41). Source : auteur.....</i>	<i>227</i>
<i>Figure 54 : Modélisation schématique des cheminements des flux de matière au sein du système économique suisse. Source : auteur.....</i>	<i>244</i>
<i>Figure 55 : Répartition des entités économiques contactées et ayant accepté de réaliser un audit de leur chaîne de production sur le territoire du Canton de Genève. Les chiffres correspondent aux entreprises présentées dans le Tableau 18. Source : auteur et groupe de travail Ecosite, 2010.....</i>	<i>250</i>

<i>Figure 56 : Ressources en eaux de surface et souterraines pouvant être exploitées pour un usage autre que la production d'eau potable et sites actuels de prélèvement constituant des symbioses industrielles pré-existantes sous la forme d'une substitution de ressource. Source : (Carvalho et Massard 2010)..</i>	253
<i>Figure 57 : Symbioses industrielles pré-existantes et mises en place entre 2006 et 2010 à Genève. Source : auteur et groupe de travail Ecosite, 2010.....</i>	259
<i>Figure 58 : Symbioses industrielles potentielles identifiées entre 2006 et 2010 par le projet pilote du groupe de travail Ecosite et qui fait l'objet d'une étude de cas dans cette thèse. Source : auteur.....</i>	260
<i>Figure 59 : Répartition des entités économiques contactées et ayant accepté de réaliser un audit de leur chaîne de production sur le territoire de Lausanne Région. Source : (Antille 2007).</i>	261
<i>Figure 60 : Flux de déchets spéciaux identifiés en 2007 par le projet pilote de Lausanne Région et destinés à la production de combustible de substitution. Source : auteur.</i>	264
<i>Figure 61 : Symbioses industrielles potentielles identifiées entre 2006 et 2008 par le projet pilote de Lausanne Région et qui fait l'objet d'une étude de cas dans cette thèse. Source : auteur.</i>	265
<i>Figure 62 : Paramètres de faisabilité et de pertinence influençant la faisabilité globale des symbioses industrielles. Source : auteur, selon Figure 32, Section 2.4.</i>	266
<i>Figure 63 : Différentes catégories de déchets de chantier et filières de valorisation selon la directive de la Confédération helvétique. Source : (OFEV et Schenk 2006).....</i>	299
<i>Figure 64 : Projet de modification de la filière des matériaux de construction et de démolition dans le canton de Genève. Source : (GESDEC 2009).....</i>	300
<i>Figure 65 : Flux de solvants usagés dont la régénération pourrait être mutualisée. Source : auteur.</i>	326
<i>Figure 66 : Modélisation de l'écosystème industriel existant dans la région de Genève et Vaud pour les entités économiques ayant participé aux projets pilotes utilisés comme études de cas. Source : auteur.</i>	346
<i>Figure 67 : Modèle d'écosystème industriel à Genève et en Suisse présentant les échanges de flux réalisables techniquement et légalement. Source : auteur.....</i>	350
<i>Figure 68 : Modélisation d'une chaîne d'approvisionnement incluant la rétrologistique. Source : (Melo, Nickel et al. 2009).....</i>	363

Table des tableaux

<i>Tableau 1 : 21 sections de la Nomenclature générale des activités économiques (NOGA) Suisse. Source : (OFS 2008).</i>	76
<i>Tableau 2 : Terminologie utilisée pour la description des filières de valorisation des déchets. Source : auteur.</i>	77
<i>Tableau 3 : 18 familles de flux constituant la nomenclature fermée des flux de matière et d'énergie utilisée pour l'audit d'entreprises en vue de la détection de symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	110
<i>Tableau 4 : Catégories et sous-catégories d'informations collectées lors de l'audit d'une entreprise. Source : auteur.</i>	113
<i>Tableau 5 : Paramètres recensés concernant les flux de matière et d'énergie lors d'un audit d'entreprise. Source : auteur, inspiré de (Adoue 2004).</i>	117
<i>Tableau 6 : Législation environnementale suisse influençant le développement des symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	126
<i>Tableau 7 : Paramètres du modèle économique de mise en œuvre des symbioses industrielles basé sur l'analyse coûts/bénéfices. Source : auteur et (Stigler 2008).</i>	133
<i>Tableau 8 : Facteurs de réduction des impacts sur l'environnement des symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	142
<i>Tableau 9 : Critères de perception positifs et négatifs des symbioses industrielles par les pouvoirs publics. Source : auteur.</i>	163
<i>Tableau 10 : Critères de perception positifs et négatifs des symbioses industrielles identifiés par le coordinateur de projets. Source : auteur.</i>	168
<i>Tableau 11 : Enoncé des domaines de compétences possibles d'une plateforme romande sur les symbioses industrielles. Source : auteur.</i>	179
<i>Tableau 12 : Liste des couches thématiques géoréférencées disponibles auprès du SITG du canton de Genève et pertinentes pour une intégration dans SymbioGIS. Source : auteur.</i>	201
<i>Tableau 13 : Liste des fonctionnalités de SymbioGIS telles qu'énoncées à la section 3.2.2 et de leur état de développement. Source : auteur.</i>	205
<i>Tableau 14 : Appariement des flux en fonction des différents niveaux de description. Source : auteur et Basile Schaeli.</i>	209
<i>Tableau 15 : Etat de développement pour les six types de synergies détectées. Source : auteur et Basile Schaeli.</i>	211
<i>Tableau 16: Secteurs d'activité des entreprises considérées lors du test de SymbioGIS. Source : auteur.</i>	213

<i>Tableau 17 : Comparaison de la détection de correspondances entre SymbioGIS, en 2010, et Presteo, utilisé dans l'étude de cas de Genève entre 2005 et 2008, pour un échantillon de 12 entreprises.</i>	
<i>Source : auteur.....</i>	<i>216</i>
<i>Tableau 18 : Rappel des 18 familles de flux constituant la nomenclature des flux de matière et d'énergie et détaillées dans la Section 2.3.1. Les lignes grisées indiquent les familles de flux pour lesquelles aucune synergie potentielle n'a été détectée dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région. Source : auteur.....</i>	<i>248</i>
<i>Tableau 19 : Liste des entreprises auditées dans le cadre du projet pilote de Genève en date du 31 janvier 2010. Source : auteur et groupe de travail Ecosite.....</i>	<i>251</i>
<i>Tableau 20 : Liste des entreprises auditées dans le cadre du projet pilote de Lausanne Région en juillet 2008. Source : auteur et (Antille 2007).....</i>	<i>262</i>
<i>Tableau 21: Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 1 : bois. Source : auteur.....</i>	<i>271</i>
<i>Tableau 22 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 3 : la cellulose et ses produits. Source : auteur.....</i>	<i>278</i>
<i>Tableau 23 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 4 : eau. Source : auteur.....</i>	<i>283</i>
<i>Tableau 24 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 5 : encres et pigments. Source : auteur.....</i>	<i>290</i>
<i>Tableau 25 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 7 : huiles et graisses. Source : auteur.....</i>	<i>294</i>
<i>Tableau 26 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 9 : matériaux inertes. Source : auteur.....</i>	<i>302</i>
<i>Tableau 27 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 11 : matières organiques. Source : auteur.....</i>	<i>309</i>
<i>Tableau 28 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 13 : objets et substances fonctionnels. Source : auteur.....</i>	<i>314</i>
<i>Tableau 29 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 15 : plastiques et caoutchoucs. Source : auteur.....</i>	<i>319</i>
<i>Tableau 30 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 16 : produits chimiques. Source : auteur.....</i>	<i>323</i>
<i>Tableau 31 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 18 : vecteurs énergétiques et mécaniques. Source : auteur.....</i>	<i>334</i>
<i>Tableau 32 : Synthèse des symbioses industrielles pertinentes dans le contexte de la Suisse romande. Source : auteur.....</i>	<i>351</i>
<i>Tableau 33 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité technique. Source : auteur.....</i>	<i>408</i>
<i>Tableau 34 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité légale. Source : auteur.....</i>	<i>409</i>

<i>Tableau 35 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité économique. Source : auteur.....</i>	<i>410</i>
<i>Tableau 36 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité légale. Source : auteur.....</i>	<i>411</i>
<i>Tableau 37 : Résumé des échelles de notation et de leur signification pour les quatre indicateurs de faisabilité et de pertinence. Source : auteur.....</i>	<i>413</i>
<i>Tableau 38 : Signification de l'indicateur de pertinence globale. Source : auteur.</i>	<i>414</i>
<i>Tableau 39 : Analyse des correspondances de la table substitutions pour 12 activités économiques de canton de Genève et comparaison avec les résultats obtenus par l'utilisation d'ISIS et de Presteo. Source : auteur.....</i>	<i>416</i>

Chapitre 1.

L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE ET LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES

1.1 REMARQUES PRELIMINAIRES : LES ENJEUX DE LA CONSOMMATION DE RESSOURCES

En ce début de XXI^{ème} siècle, le modèle économique et de production et de consommation de notre société industrielle moderne dépend fortement de ressources naturelles présentes dans la croûte terrestre. L'accroissement de la vitesse à laquelle nous extrayons et consommons certains éléments et substances chimiques nous rendra leur accessibilité plus problématique à l'avenir, car la manière dont le système industriel utilise ces ressources n'est pas durable : leur durée de vie dans l'économie est courte et une part importante n'est pas recyclée et finit stockée dans des décharges ou diffusée dans l'environnement.

La question des combustibles fossiles, en particulier les carburants fossiles liquides, est aujourd'hui au centre des préoccupations du monde économique et politique. Le monde scientifique débat depuis plusieurs années pour tenter de déterminer si le pic de production du pétrole a déjà été atteint. A ce sujet, la société British Petroleum indique que la production mondiale a baissé de 2 millions de barils par jour en moyenne en 2009, soit la plus importante baisse depuis 1982 (BP 2010) (Figure 1).

La question de la disponibilité des ressources ne concerne pas que le pétrole. Le phosphore est un élément vital de l'agriculture moderne. Il est utilisé comme fertilisant à très large échelle dans les systèmes intensifs de culture (Schmid Naset, Bader et al. 2008). A titre d'exemple, la Suisse en a importé environ 16'500 tonnes en 2006, dont 90% étaient destinés à l'agriculture (Binder, de Baan et al. 2009). Or, de nombreux chercheurs prévoient que le pic d'extraction des roches contenant des phosphates pourrait être atteint dans moins de 30 ans (Figure 2) ce qui ne manquera pas d'avoir une influence importante sur la production agricole suisse et mondiale et sur l'approvisionnement de certaines régions du monde. Le sujet est d'autant plus préoccupant que les intrants agricoles se recyclent difficilement et sont largement dispersés dans la nature (Cordell, Drangert et al. 2009).

Si certaines substances ne se recyclent pas, d'autres peuvent être récupérées et réutilisées. C'est en particulier le cas des métaux, une famille d'éléments chimiques indispensables à l'ensemble des activités économiques modernes, en particulier les secteurs de la construction, de l'électronique et des transports. Présents dans la croûte terrestre sous forme de minerais, leur extraction et raffinage constituent un enjeu environnemental important. A nouveau, les réserves ne sont pas infinies. Plus de 50% du mercure, de

l'argent ou du plomb présents dans la croûte terrestre ont déjà été extraits (Figure 3). Les enjeux se situent donc principalement dans la mise en œuvre de filières de récupération et de recyclage efficaces qui permettent de garantir leur accessibilité à long terme.

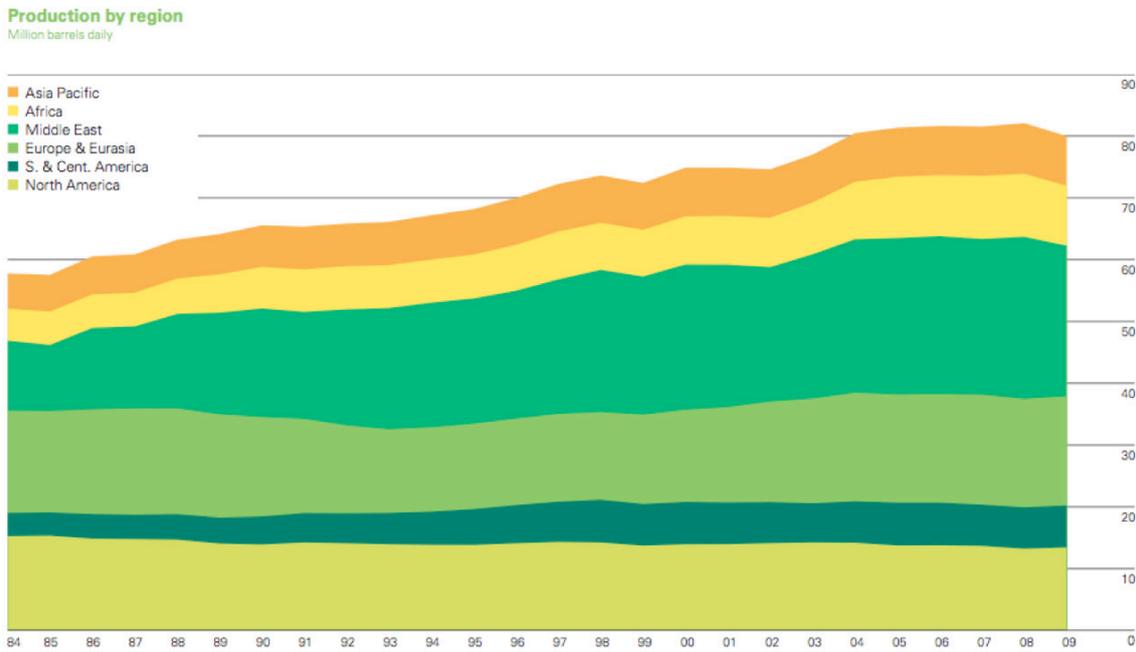


Figure 1 : Production mondiale de pétrole entre 1984 et 2009. Source : (BP 2010).

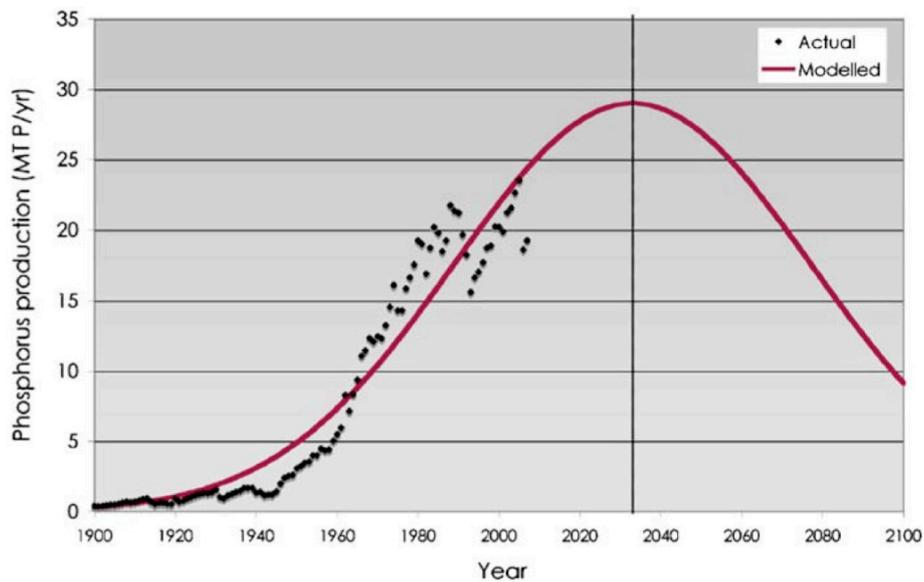


Figure 2 : « Pic de Hubbert » pour les roches phosphatées. Source : (Cordell, Drangert et al. 2009).

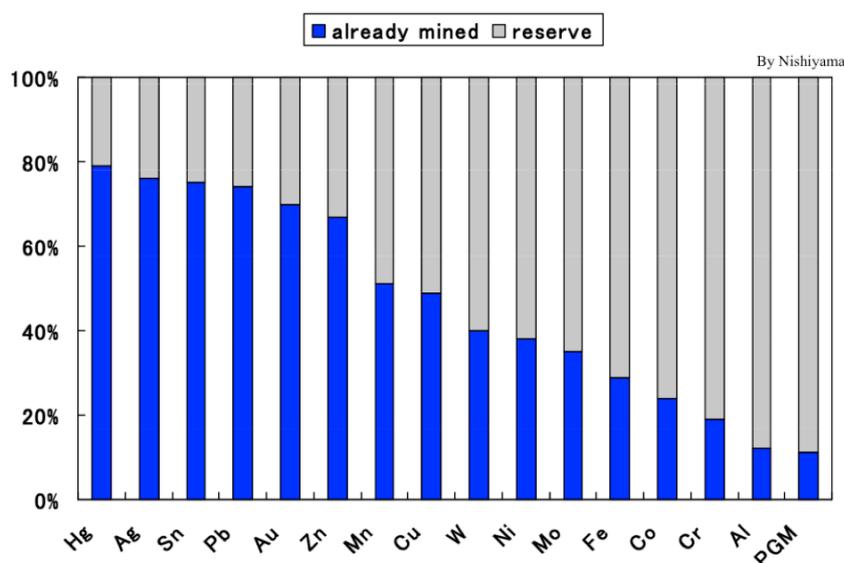


Figure 3 : Proportions de métaux déjà extraits et encore disponibles sous forme de réserves. Source : (Halada 2008).

Du point de vue des ressources, les impacts des activités industrielles sur les écosystèmes naturels ne représentent pas les seuls enjeux du XXI^{ème} siècle. La diminution de la disponibilité des ressources naturelles représente un risque pour le système économique et l'organisation sociale actuelle. Il existe cependant un lien de cause à effet très fort entre les impacts environnementaux et l'extraction de ressources. En effet, pour prendre l'exemple du changement climatique, lorsque des gaz à effet de serre sont rejetés dans l'atmosphère, cela signifie dans de nombreux cas que des ressources ont été extraites de la croûte terrestre. Cette activité a également bien d'autres effets que le changement climatique : pollution des eaux, pollution de l'air ou contamination des sols. Comme nous venons de le rappeler, les réserves de la croûte terrestre ne sont pas infinies. Ainsi, les activités économiques actuellement dépendantes des ressources naturelles non renouvelables et renouvelables vont être touchées par les variations de disponibilité et de prix de ces dernières.

De nombreuses solutions techniques, organisationnelles, économiques et politiques existent pour faire face à ces problèmes. Lorsqu'un produit est usagé, il est encore trop souvent mis au rebut, dispersé dans l'environnement ou brûlé. Or, des solutions permettent d'éviter que les déchets s'accumulent dans certaines régions du monde et dans les océans. Réduire la dépendance de l'économie aux ressources non renouvelables et diminuer les impacts de ces activités sur l'environnement implique de comprendre leurs cheminements et de proposer des solutions pour les utiliser de manière beaucoup plus intelligente.

1.2 OBJECTIFS

L'écologie industrielle offre des méthodologies qui permettent de comprendre l'utilisation des ressources, leurs cheminements dans l'économie et leurs impacts sur l'environnement. Elle offre également des solutions pour développer les collaborations entre acteurs du monde industriel. Ce domaine de recherche et d'application, appelé les symbioses industrielles, est le sujet de cette thèse. En créant des réseaux d'échanges de connaissance, de matières et d'énergie et en mutualisant certaines activités, elles proposent des solutions pour un usage plus local et plus efficace des ressources. Les définitions de ces termes seront données plus loin.

L'objectif de cette thèse est de développer de nouvelles solutions, procédures et outils d'aide à la décision pour favoriser l'essor de symbioses industrielles pertinentes par les entreprises d'un territoire. Le terme territoire est utilisé ici pour définir un espace géographique indépendant de son sens politique et administratif.

En tant qu'ingénieur en environnement diplômé de l'EPFL, j'ai utilisé une approche de la problématique orientée vers des préoccupations techniques et organisationnelles, impliquant le développement d'un outil informatique et des analyses de faisabilité technique des symbioses industrielles. Cependant, les réflexions sont enrichies par des considérations plus proches des sciences sociales comme l'analyse de jeux d'acteurs, des processus de prise de décision et l'étude des contextes économiques et légaux des territoires considérés, ainsi que liées à l'aménagement du territoire.

1.3 L'ÉCOLOGIE INDUSTRIELLE

L'écologie industrielle est un domaine de recherche qui utilise l'analogie entre les écosystèmes naturels et le système industriel pour étudier l'utilisation des ressources naturelles et les impacts environnementaux des activités économiques. Suren Erkman, en prologue de son livre « Vers une écologie industrielle », décrit cette analogie de la manière suivante (Erkman 1998) :

Les environmentalistes et leurs précurseurs se sont depuis longtemps préoccupés des conséquences de l'activité industrielle, essentiellement en étudiant les effets des pollutions sur les écosystèmes. [...] L'écologie industrielle explore l'hypothèse inverse : il est possible d'envisager le système industriel comme un cas particulier d'écosystème. Après tout, on peut décrire le système industriel comme une certaine configuration de flux et de stocks de matières, d'énergie et d'information, tout comme les écosystèmes biologiques.

Le terme d'écologie industrielle définit plus précisément le contenu du domaine de recherche. Elle est *industrielle* car elle concerne le design de produits et les procédés de production et de manufacture. Les

entreprises sont ainsi considérées comme le centre de l'amélioration environnementale, en raison de leurs connaissances technologiques. Le terme « industry », traduit en français par activité économique, regroupe l'ensemble des activités de production et de consommation de biens et de services. Elles sont le point central, comme source importante, mais non unique, des impacts sur l'environnement (Ayres et Ayres 2002).

L'écologie industrielle est *écologique*. Un des articles fondateurs de la discipline, intitulé « Des stratégies industrielles viables » est publié en 1989 dans un numéro spécial consacré à la gestion de la planète terre de la revue de vulgarisation *Scientific American, Pour La Science*, en version française (Frosch et Gallopoulos 1989). Il est cosigné par deux cadres de l'entreprise *General Motors* (M. Robert Frosch, alors vice-président de la recherche et M. Nicholas Gallopoulos, alors responsable de la recherche sur les moteurs) (Erkman 1998). Les deux auteurs y développent un concept destiné à créer des méthodes de production industrielle aux impacts environnementaux réduits. Ils arrivent à la conclusion que le modèle des activités économiques doit être transformé en un système plus intégré, qu'ils appellent un écosystème industriel :

Dans ce système, la consommation d'énergie et de matières est optimisée, la production de déchets est minimisée et les effluents d'un procédé [...] sont utilisés comme matières premières pour un autre procédé.

L'écosystème industriel va fonctionner de manière similaire à un écosystème biologique (les plantes synthétisent des nutriments qui nourrissent les herbivores, qui eux-mêmes nourrissent les carnivores, dont les déchets et les carcasses nourrissent les futures générations de plantes). Un écosystème idéal ne pourra jamais être atteint dans la pratique, mais les producteurs et les consommateurs doivent changer leurs habitudes pour s'en approcher [...].¹

Les deux auteurs indiquent également que l'écologie industrielle étudie les écosystèmes naturels ou « non-humains », comme modèle pour les activités économiques. En effet, le taux de recyclage des ressources dans la plupart des écosystèmes naturels est extrêmement élevé et ces derniers peuvent servir d'exemple aux acteurs économiques pour boucler les flux de matière et d'énergie. En utilisant l'analogie proposée par l'écologie industrielle, un écosystème industriel constitue une manière de considérer l'ensemble du tissu économique sur un territoire donné. Nous verrons plus tard qu'il peut être viable sur le long terme ou non, en fonction de son degré de maturation.

¹ Traduction de l'auteur selon (Frosch and Gallopoulos 1989) :

In such a system the consumption of energy and materials is optimized, waste generation is minimized and the effluents of one process [...] serve as the raw material for another process.

The industrial ecosystem would function as an analogue of biological ecosystems. (Plants synthesize nutrients that feed herbivores, which in turn feed a chain of carnivores whose wastes and bodies eventually feed further generations of plants.) An ideal industrial ecosystem may never be attained in practice, but both manufacturers and consumers must change their habits to approach it [...].

L'écologie industrielle propose de replacer les activités humaines de l'époque moderne dans le contexte des écosystèmes naturels qui les supportent, examinant la source des ressources utilisées et déterminant le meilleur devenir possible pour les déchets (Ayres et Ayres 2002). Elle s'intéresse également à l'évolution du système industriel dans sa globalité et à long terme. Aujourd'hui, elle est souvent décrite comme un outil efficace pour accompagner cette transition vers un système industriel et économique viable. On peut résumer les éléments présentés ci-dessus par la définition donnée par Hardin Tibbs (1993) et qui en retient l'essentiel :

Par essence, l'écologie industrielle implique de concevoir les infrastructures nécessaires aux activités économiques comme si elles étaient plusieurs écosystèmes imbriqués et façonnés par l'être humain, interagissant avec l'écosystème naturel global. L'écologie industrielle utilise le schéma de fonctionnement des écosystèmes naturels comme modèle pour résoudre les problèmes environnementaux, créant ainsi un nouveau paradigme pour le système industriel. Il s'agit de design « biomimétique » à large échelle, impliquant une réorientation importante de notre perception, passant de la conquête de la nature, à la coopération. ²

Les premières actions de l'écologie industrielle comme domaine d'action pour la réduction des impacts environnementaux des activités économiques ont été initiées et décrites par des représentants de l'industrie elle-même, à l'image de Frosch et Gallopoulos (1989). Ils émettent l'idée que le modèle linéaire et simpliste de production utilisé jusqu'alors, doit être remplacé par un modèle plus intégré qu'ils appellent un écosystème industriel. Parallèlement, la ville de Kalundborg au Danemark, a développé un tel système depuis les années 60 à l'initiative des entreprises elles-mêmes (Ehrenfeld et Gertler 1997). L'expérience de Kalundborg montre que les zones ou parcs industriels peuvent dès lors être vus, tout comme les écosystèmes naturels, en termes de flux de matière et d'énergie. L'analyse du cheminement de ces flux permet de déterminer comment la consommation de ressources et la production de déchets peuvent être réorganisées et intégrées dans les cycles naturels. Les objectifs premiers sont de favoriser un usage efficace des ressources, le recyclage et la réutilisation des déchets et de l'énergie (les termes recyclage et réutilisation sont définis respectivement dans les sections 1.3.1.5 et 1.5.1.1), réduisant ainsi les impacts des activités économiques sur l'environnement (Tibbs 1993; Côté et Hall 1995). Selon Braden R. Allenby, il s'agit donc de passer d'un système industriel constitué d'une collection de flux linéaires qui s'ignorent entre eux (écosystème de type I), à un écosystème industriel intégrant des réseaux d'interactions complexes destinés à limiter l'utilisation de ressources et la production de déchets (écosystèmes de type II et III), alors considéré comme « mature » (Figure 4).

² Traduction de l'auteur selon (Tibbs 1993) :

In essence, industrial ecology involves designing industrial infrastructures as if they were a series of interlocking man-made ecosystems interfacing with the natural global ecosystem. Industrial ecology takes the pattern of the natural environment as a model for solving environmental problems, creating a new paradigm for the industrial system in the process. This is "biomimetic" design on the largest scale, and represents a decisive reorientation from conquering nature—which we have effectively already done—to cooperating with it.

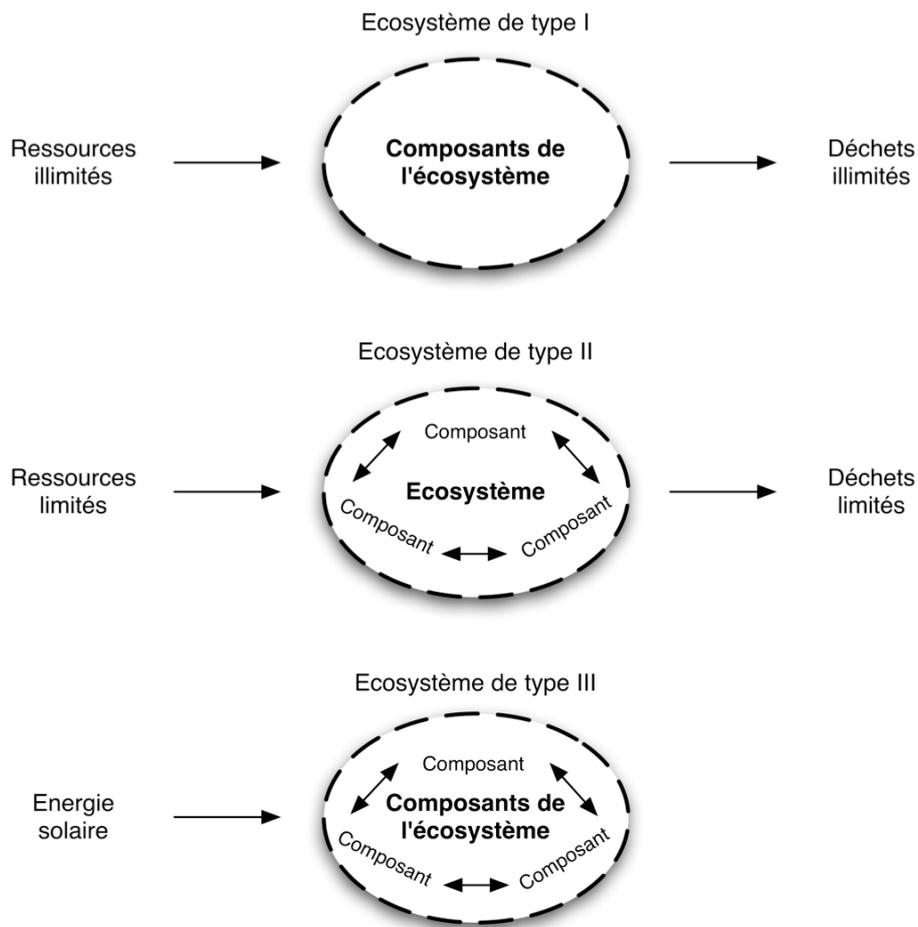


Figure 4 : Les trois types d'écosystèmes industriels. Source : (Lifset et Graedel 2002)

Si l'écosystème de type II est nettement plus efficace que celui de type I, on constate néanmoins qu'il n'est pas plus viable à long terme, car les flux restent majoritairement unidirectionnels (Lifset et Graedel 2002). Le processus d'évolution d'un écosystème de type I vers un écosystème de type II ou III est appelé « maturation », terme emprunté à l'écologie scientifique pour décrire le degré de développement d'un écosystème naturel. La Figure 4 est reprise de (Lifset et Graedel 2002). Cependant, dans le cas de l'écosystème de type III, il conviendrait d'ajouter une flèche sortante représentant le rayonnement infrarouge.

L'écologie industrielle a ainsi développé ses propres outils de maturation du système industriel. La plupart des méthodologies et outils qu'elle propose tendent aujourd'hui à la création d'écosystèmes de type II, ce qui représente certes un gain d'efficacité, mais ce qui ne peut pas constituer une fin en soi.

1.3.1 Les méthodologies et procédures de l'écologie industrielle

Depuis plus d'une décennie, la recherche en écologie industrielle a développé plusieurs méthodologies de quantification et procédures appliquées d'optimisation destinées à accompagner et à accélérer la maturation des écosystèmes industriels (Figure 5). Les stratégies de maturation, ou d'éco-restructuration, reposent sur quatre principes décrits par Suren Erkman (1998) :

1. *Valoriser les déchets comme des ressources*
2. *Boucler les cycles de matières et minimiser les émissions dissipatives*
3. *Dématérialiser les produits et les activités économiques*
4. *Décarboniser l'énergie*

Ces principes ont depuis été discutés en détail dans de nombreux ouvrages consacrés à l'écologie industrielle ou à ses domaines d'action (Tibbs 1993; Ehrenfeld 1997; Erkman 1998; Ayres et Ayres 2002; Bourg et Erkman 2003; Ruth et Davidsdottir 2009). Pour les atteindre, l'écologie industrielle peut être appliquée ou étudiée à différentes échelles administratives et spatiales, allant de l'entreprise, au groupe d'entreprises, de la commune à la région et jusqu'au niveau global (Lifset et Graedel 2002). L'écologie industrielle est aujourd'hui encore un champ de recherche émergent dont les frontières ne sont pas complètement définies. De nombreux chercheurs et ingénieurs sont perplexes lorsqu'ils sont confrontés la première fois au concept d'écologie industrielle et se demandent ce que ce nouveau domaine a à offrir qui ne soit pas déjà couvert par un autre concept. Comme l'explique Colin G. Francis (2003), l'écologie industrielle ne doit pas remplacer les autres idées, mais pourrait fournir la colle permettant de les tenir ensemble, ce qui permettrait d'envisager certains concepts sous un angle nouveau et donc de les exploiter de manière plus soutenable.

Les considérations précédentes n'ont pas la prétention de constituer une revue bibliographique exhaustive ni de servir de référence pour des travaux. Il s'agit ici de poser les bases conceptuelles nécessaires à la compréhension de ce travail de recherche et de définir un certain nombre de termes auxquels il sera fait référence tout au long de celui-ci. Pour les besoins de la présente recherche, les méthodologies et procédures suivantes sont brièvement présentées dans les sections suivantes : l'éco-design, l'éco-efficacité, l'analyse de cycle de vie, l'analyse des flux de matière et d'énergie et la comptabilité physique. Les symbioses industrielles et le développement éco-industriel, en tant que sujets principaux de ce travail, sont abordés en détail dans la Section 1.4.

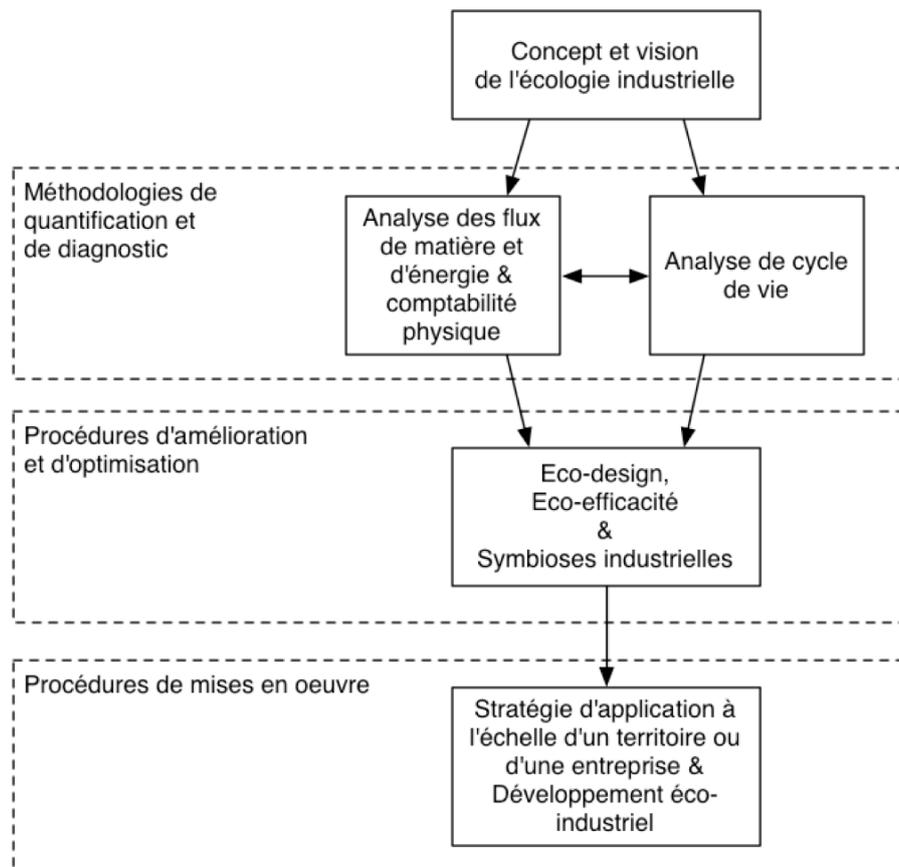


Figure 5 : Organisation et relation entre les méthodologies quantitatives et les procédures de mise en œuvre de l'écologie industrielle. Source : auteur.

1.3.1.1 L'analyse de flux de matière et d'énergie

Il s'agit de la première méthodologie quantitative de l'écologie industrielle. L'analyse des flux de matière et d'énergie, de l'anglais Material Flow Analysis (MFA) ou Material and Energy Flow Analysis (MEFA) est également appelée métabolisme des activités économiques, métabolisme territorial ou analyse des flux et stocks. Elle a pour objectif de comprendre la circulation des flux de matière et d'énergie en lien avec les activités humaines, depuis leur extraction, jusqu'à leur inévitable réintégration dans les cycles biogéochimiques (Erkman 1997).

L'analyse des flux de matière et d'énergie peut être appliquée à toutes les échelles territoriales. Plusieurs villes importantes comme Bruxelles (Billen, Toussaint et al. 1983), Hong-Kong (Newcombe, Kalma et al. 1978; Warren-Rhodes et Koenig 2001), Vienne (Obernosterer et Brunner 1998), Paris (Barles 2004) et Genève (Faist, Frischknecht et al. 2003) ont réalisé de telles études.

Au début des années nonante, Peter Baccini and Paul H. Brunner transposent la méthodologie à l'échelle régionale (Baccini et Brunner 1991; Baccini 1996). Depuis, elle a été appliquée à des substances (on parle alors de d'analyse de flux de substance), des produits, des procédés et des secteurs d'activité, à différentes échelles d'espace et de temps (Erkman 1998). La définition la plus couramment utilisée est celle donnée par le même Paul H. Brunner et Helmut Rechberger dans leur livre de référence (Brunner et Rechberger 2004) :

*L'analyse de flux de matière (MFA) est une analyse systématique des flux et stocks de matière à l'intérieur d'un système défini dans l'espace et le temps. Elle fait le lien entre la source, le cheminement et la destination, intermédiaire ou finale, des matériaux. Basée sur le principe thermodynamique de la conservation de la masse, les résultats d'un MFA peuvent être contrôlés par une simple comparaison des entrants, des stocks et des flux sortants d'un procédé. Cette caractéristique du MFA en fait un outil d'aide à la décision intéressant pour le management des ressources, des déchets et de l'environnement en général.*³

Un exemple est abordé dans la description de l'étude de cas de Genève dans la Section 1.6.3.1.

1.3.1.2 La comptabilité physique

La comptabilité physique des flux de matière et d'énergie des activités économiques permet d'estimer et de suivre la consommation de ressources d'un territoire à intervalles réguliers. L'analyse des tendances permet de mesurer l'impact des politiques publiques. Les données peuvent également être utilisées pour le calcul d'indicateurs spécifiques de la performance environnementale des activités économiques d'un territoire. Cette méthodologie permet de quantifier les entrants et les sortants de tout système économique et de suivre l'évolution de la consommation des ressources en fonction de l'évolution de l'économie (Bringezu, Schütz et al. 2004). Les principaux indicateurs de la comptabilité physique sont généralement divisés en 5 groupes (Bringezu 2009) :

Les indicateurs de flux entrants : le DMI (direct material input) comptabilise les matériaux qui ont été extraits ou récoltés pour être consommés sur un territoire. Il comprend les extractions domestiques utilisées (domestic extraction used, DEU) et les importations de matières premières et produits manufacturés. Le TMR (total material requirement) inclut le DMI ainsi que les matériaux extraits mais qui n'entrent pas dans le système économique considéré (les extractions locales non utilisées et les flux

³ Traduction de l'auteur selon (Brunner and Rechberger 2004) :

Material flow analysis (MFA) is a systematic assessment of the flows and stocks of materials within a system defined in space and time. It connects the sources, the pathways, and the intermediate and final sinks of a material. Because of the law of the conservation of matter, the results of an MFA can be controlled by a simple material balance comparing all inputs, stocks, and outputs of a process. It is this distinct characteristic of MFA that makes the method attractive as a decision-support tool in resource management, waste management, and environmental management.

cachés liés aux importations). Le TMR représente ainsi la totalité des besoins en matériaux de l'économie d'un territoire.

Les indicateurs de flux sortants : ils comptabilisent les flux d'exports ou de rejets sous la forme d'émissions. Le DPO (domestic processed output) consiste en toutes les pertes et les émissions engendrées par les processus de production et de consommation. Le TDO (total domestic output) inclut en plus les extractions domestiques non utilisées. Le TMO (total material output) est le plus complet car il inclut également les exportations.

Les indicateurs de consommation : ils décrivent les matériaux transportés ou consommés dans l'économie. Ils incluent les indicateurs DMI et TMR, auxquels les exportations ont été soustraites, soit le DMC (domestic material consumption) et le TMC (total material consumption).

Les indicateurs de balance : le NAS (net addition to stock) mesure la croissance physique de l'économie, à partir de la différence entre entrants et sortants. La différence entre les imports et les exports définit le PTB (physical trade balance), soit le surplus ou le déficit matériel du commerce d'une économie.

Les indicateurs de productivité : ils sont construits en combinant les indicateurs de performance économique et les indicateurs de la comptabilité physique. Ils renseignent sur l'efficacité de l'utilisation des ressources de l'économie. Par exemple, le produit intérieur brut (PIB) divisé par le TMR mesure la productivité matérielle. Elle correspond à la valeur ajoutée créée dans l'économie par unité de matière. L'évolution de ces indicateurs de productivité montre comment l'utilisation de matières ou le besoin total de ressources a été découplé de la croissance économique ou comment la valeur ajoutée dans certains secteurs évolue. Si l'indicateur de productivité augmente, c'est que l'économie a besoin de moins de matière par unité de richesse produite.

Les indicateurs de découplage ou de dématérialisation : ils cherchent à mesurer la viabilité de l'utilisation des flux de matière et d'énergie. Ils permettent de déterminer si l'utilisation des ressources naturelles se fait sans dépasser les fonctions d'absorption et de régénération naturelles des écosystèmes. Ces indicateurs sont encore en cours d'élaboration.

Le choix des indicateurs et de leur utilisation dépend des enjeux politiques et économiques. Leur utilisation est fortement liée à la qualité des données disponibles. L'Office statistique de l'Union Européenne (Eurostat) propose d'utiliser le DMI et le TMR comme indicateurs centraux. L'OCDE préfère le DMC au TMR car il a l'avantage d'une meilleure disponibilité des données. Néanmoins, le TMR est le seul à pouvoir prendre en compte la totalité des bases matérielles nécessaires (Bringezu 2009).

Pour mettre en œuvre des statistiques qui permettent le calcul d'indicateurs robustes, la première étape consiste à réunir les données disponibles et à tenter de créer des systèmes de collecte pour celles qui manquent. Pour les indicateurs de base choisis, la totalité des intrants du territoire considéré (DMI) et la consommation du système (DMC), il s'agira de réunir les données propres à la production locale (DEU), aux importations, ainsi que la consommation effective. Si des données relatives à la consommation ne

sont toutefois pas directement accessibles, les données d'exportation ainsi que les pertes pourront permettre de la calculer ou, au moins, de l'évaluer.

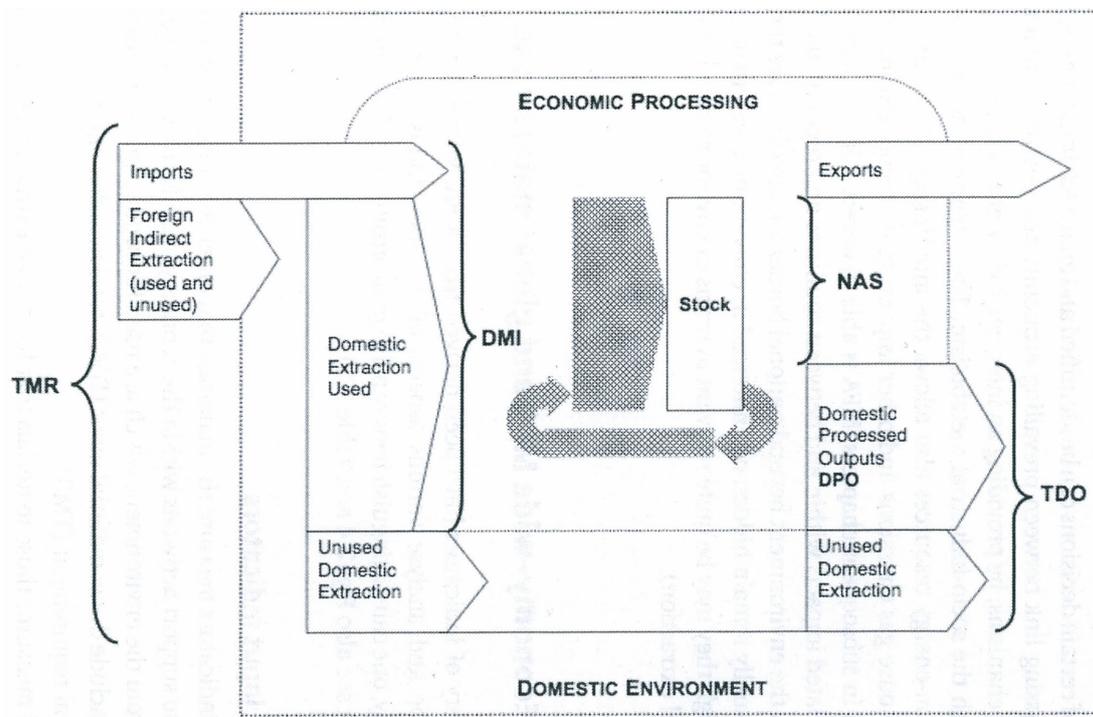


Figure 6 : Les indicateurs de la comptabilité physique. Source : (Bringezu 2009).

1.3.1.3 L'analyse de cycle de vie

L'analyse de cycle de vie (ACV) évalue les impacts environnementaux potentiels d'un produit, d'un service ou d'un système en relation à une fonction particulière et ceci en considérant toutes les étapes de son cycle de vie (Jolliet, Saadé et al. 2005). Le cycle de vie comprend en général les cinq étapes suivantes : la pré-production, la production, la distribution, l'usage et la fin de vie (Figure 7). Cette méthode normalisée (ISO 14040 à 14043) permet d'identifier les points sur lesquels un produit existant peut être amélioré et elle contribue au développement de nouveaux produits. Il s'agit donc d'un outil appliqué de diagnostic environnemental en entreprise. Elle se déroule généralement en quatre phases : la définition des objectifs, l'inventaire des extractions de ressources naturelles et des émissions, l'analyse de leurs impacts et l'interprétation des résultats (ISO14040 2006).

Le nombre d'études d'analyse de cycle de vie est aujourd'hui en forte croissance dans le domaine de l'industrie. Elles permettent aux entreprises d'améliorer leur utilisation de ressources et de communiquer sur leur progrès en matière d'environnement. Elles deviennent ainsi un outil d'aide à la décision pour la

compréhension des impacts environnementaux de la production, mais également pour le conseil aux consommateurs.

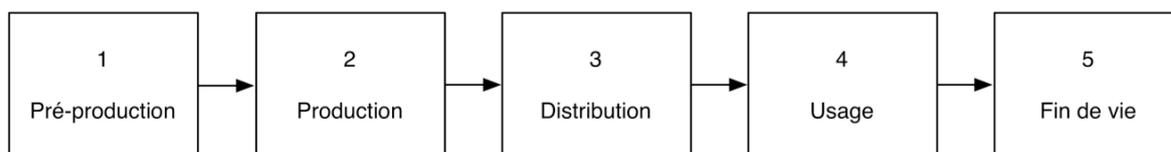


Figure 7 : Le cycle de vie d'un produit. Source : (Graedel et Howard-Grenville 2005)

1.3.1.4 L'éco-design

Le terme éco-design vient de l'anglais « design for the environment ». Il peut être traduit de plusieurs manières : éco-conception, design écologique ou durable. Il s'agit d'une procédure d'optimisation intégrant les principes de la recherche et du développement en entreprise et de l'ingénierie technique. Il a pour objectif l'intégration de critères environnementaux dès la phase de design d'un produit (Karlsson et Luttrupp 2006). Selon (van Berkel, Willems et al. 1997), l'éco-design est un processus de design de produit pendant lequel les aspects environnementaux sont considérés au même niveau que les autres attributs classiques du design plutôt que comme une contrainte. L'objectif est que l'introduction des critères environnementaux n'ait que très peu ou pas du tout d'effet sur la performance du produit, son utilisation ou sa fonction. Ainsi, le design d'un produit devrait être basé non seulement sur des connaissances en design de produit, mais également en ingénierie de l'environnement. En général, l'éco-design implique le recours à l'analyse de cycle de vie comme méthode d'analyse des scénarios possibles et pour justifier les choix techniques effectués (Karlsson et Luttrupp 2006).

1.3.1.5 L'éco-efficacité

Le World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), définit l'éco-efficacité comme une philosophie de management encourageant les entités économiques à rechercher des améliorations environnementales permettant d'augmenter parallèlement la rentabilité économique d'un produit ou d'un service. Ces principes reposent ainsi sur des considérations économiques comme l'accroissement des profits en lien avec la problématique environnementale. Elle favorise ainsi l'innovation et donc la croissance et la compétitivité (WBCSD 2000). Le corollaire à cette définition stipule que :

L'éco-efficacité est atteinte par la production de produits et de services à prix compétitifs qui permettent de satisfaire les besoins des êtres humains et leur apporte une bonne qualité de vie,

tout en réduisant progressivement les impacts écologiques et l'usage des ressources sur l'entier du cycle de vie à un niveau au moins équivalent à la biocapacité estimée de la planète. ⁴

Considérée ici comme une procédure d'optimisation, son application a trois objectifs : premièrement, réduire la consommation de ressources (énergie, eau, matières) en augmentant le recyclage et en fermant les boucles de matières ; deuxièmement, réduire l'impact des activités économiques sur la nature et, troisièmement, augmenter la valeur des produits et des services en faisant plus (fonctionnalité, flexibilité, modularité) avec moins de ressources. De nombreuses entreprises ajoutent un quatrième objectif, soit la mise en place d'un système de management environnemental, qui doit être intégré dans le système de management « classique » de l'entreprise. Celui-ci sert alors de guide à la mise en place de la stratégie d'éco-efficacité (WBCSD 2000). Ce concept apparaît donc comme complémentaire à celui de production plus propre qui sera présenté dans la Section 1.5.1.2. L'éco-efficacité se concentrant sur la partie stratégique du business (création de la valeur) alors que la production propre sur la partie opérationnelle (production) (van Berkel 2007).

⁴ Traduction de l'auteur selon (WBCSD 2000) :

Eco-efficiency is achieved by the delivery of competitively-priced goods and services that satisfy human needs and bring quality of life, while progressively reducing ecological impacts and resource intensity throughout the life-cycle to a level at least in line with the earth's estimated carrying capacity.

1.4 LES SYNERGIES ET LES SYMBIOSES INDUSTRIELLES

Plusieurs concepts existent pour définir la stratégie de maturation du système industriel consistant à boucler les flux de matière et d'énergie en impliquant les activités économiques⁵ d'un territoire. La littérature spécialisée propose de nombreux termes et définitions. Ils sont parfois précis et contraignants, ou au contraire plus larges et parfois même vagues. Tous se réfèrent cependant à la stratégie de l'écologie industrielle consistant à boucler les cycles de matières et à minimiser les émissions dissipatives. Cette section, sans chercher à les discuter de manière exhaustive, propose plusieurs définitions issues de la littérature de la biologie, de la gestion d'entreprise et du domaine de l'écologie industrielle.

1.4.1 Les symbioses en biologie

Dans les écosystèmes naturels, de nombreux types de collaboration existent entre les organismes. Dans certains cas, ceux-ci s'associent pour devenir plus résistants ou pour survivre. En biologie, le *mutualisme* décrit la relation entre deux populations, espèces ou organismes différents, souvent durable dans la mesure où chacun trouve un avantage (protection, bénéfice alimentaire, alarme) à cette association. Un certain type de mutualisme, la *symbiose* est définie comme une association étroite et stable de deux organismes différents vivant le plus souvent en équilibre l'un avec l'autre et tirant des bénéfices mutuels de cette situation. Les partenaires d'une symbiose sont nommés les symbiotes. Il s'agit d'une vie en association à bénéfice mutuel et de type obligatoire, les symbiotes ne pouvant pas vivre séparément, et impliquant des interactions physiques intenses (Morère et Pujol 2003; Bronstein 2009). Dans la plupart des cas, les avantages et/ou inconvénients réciproques et partagés entre les organismes créent des bénéfices pour la nouvelle entité émergente.

Un exemple connu de symbiose est l'association entre certaines plantes de la famille des légumineuses et une bactérie, les Rhizobiums capables de fixer l'azote atmosphérique. Lorsque la teneur en azote du sol est insuffisante la plante accepte le développement des bactéries sur ses racines et lui fournit l'énergie nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique, un processus très gourmand en énergie. Le Rhizobium ne peut donc pas vivre sans la légumineuse, ce qui n'est pas le cas dans l'autre sens (Massard 2004).

Toujours en biologie, lorsque certains animaux ou organismes vivent à proximité d'autres êtres en tirant de cette situation un bénéfice, on parle de *commensalisme*. Les deux parties peuvent dans ce cas vivre séparément (Morère et Pujol 2003). Il s'agit d'une interaction où l'hôte fournit une partie de sa propre nourriture à l'autre organisme, appelé commensal. L'hôte n'obtient en revanche le plus souvent aucune

⁵ Par activités économiques, nous entendons ici l'ensemble des secteurs économiques primaire, secondaire et tertiaire, ainsi que les ménages.

contrepartie. Cependant, à la différence du *parasitisme*, le commensalisme n'est pas dangereux pour l'hôte qui, dans la plupart des cas, ignore tout de la relation.

De nombreuses questions subsistent sur ces associations et leur influence sur les écosystèmes naturels. Il semble dans tous les cas évident que la survie de nombreuses espèces dépend d'autres organismes et pas seulement de leur habitat (Bronstein 2009). Le mutualisme, la symbiose et le commensalisme sont aujourd'hui encore un domaine de recherche très actif en biologie.

L'analogie entre écosystèmes naturels et systèmes industriels a été étudiée par de nombreux auteurs du domaine de l'écologie industrielle (Allenby et Cooper 1994; Ayres 2004; Nielsen 2007). Comme nous le verrons plus tard, le concept des symbioses industrielles est directement tiré des définitions précédentes, même si elles s'apparentent plutôt à une forme de mutualisme.

1.4.2 Les synergies dans l'entreprise

Si le terme symbiose provient de la biologie et définit une interaction mutuellement bénéfique entre plusieurs organismes, le terme synergie provient de la physique et en particulier de la mécanique. Jean Belotti (2005) explique que le mot synergie provient du grec « sun » (avec) et de « ergon » (travail) et peut se traduire par « association de plusieurs organes pour l'accomplissement d'une fonction ». Depuis le milieu du XXème siècle, ce terme a été repris et appliqué aux domaines de l'entreprise et du management. A l'échelle de l'entreprise, il existe ainsi plusieurs types de synergies :

1. La synergie *organisationnelle* décrit une collaboration issue de différents sous-ensembles ou départements d'une entreprise. Elle est initiée par une organisation hiérarchique composée d'êtres humains n'agissant pas en tant qu'individus.
2. La synergie *relationnelle* est issue non plus d'une organisation, mais des employés en tant qu'individus. Selon Jean Belotti, elle se développe principalement grâce à des impulsions externes et rarement spontanément.
3. La synergie *stratégique* résulte de décisions stratégiques prises au plus haut niveau de l'entreprise, comme les accords commerciaux, l'exploitation commune d'infrastructures industrielles, les échanges d'informations et d'outils de production. Elle vise à obtenir une meilleure productivité.

Les deux premiers types de synergies peuvent être créées au sein d'une entreprise (intra-entreprise). Le troisième type peut émerger du rapprochement entre plusieurs d'entre elles. Il s'agit alors d'une synergie inter-entreprises. Selon Belotti (2005), la synergie stratégique inter-entreprises a comme objectif d'apporter une amélioration constatée sous la forme d'économies d'échelle, d'apprentissage, due au

progrès technique ou en termes de synergies organisationnelles ou relationnelles entre plusieurs acteurs économiques distincts. Les objectifs environnementaux sont absents de cette définition.

Pour comprendre la relation entre les définitions précédentes et la volonté de boucler les cycles de matières, il est intéressant de détailler la manière dont les auteurs précurseurs de l'écologie industrielle ont tiré un concept similaire de la biologie.

1.4.3 Les symbioses industrielles au sens de l'écologie industrielle

Suren Erkman (1997), dans son article de référence sur l'histoire de l'écologie industrielle, explique que les premières mentions du concept de symbioses industrielles datent du début des années 1970 et en particulier d'un livre intitulé *The Restoration of the Earth* (Taylor et Humpstone 1972). Il a été ensuite repris quinze ans plus tard par des représentants de l'industrie (Frosch et Gallopoulos 1989) :

[...] la reconnaissance que le modèle traditionnel des activités économiques, au sein duquel chaque procédé de production nécessite des matières premières et génère un produit destiné à la vente et des déchets devant être pris en charge doit être transformé en un modèle plus intégré : un écosystème industriel. Dans un tel système, la consommation d'énergie et de matière est optimisée, la production de déchets est minimisée et les effluents d'un procédé [...] sont utilisés comme matière première pour un autre procédé. L'écosystème industriel fonctionne alors comme une analogie d'un écosystème naturel. ⁶

L'analogie avec les concepts de chaîne alimentaire ou de réseaux trophiques issus de la recherche en écologie est mentionnée clairement dans cette définition tout comme l'idée de considérer les activités économiques d'un territoire comme une forme d'écosystème. Chaque entreprise d'un système industriel est considérée comme un organisme pouvant se nourrir des déchets de son voisin, permettant ainsi l'utilisation en cascade des ressources. Cette analogie entre l'écologie scientifique et le système industriel a d'ailleurs été étudiée par de nombreux auteurs (Allenby et Cooper 1994; Ayres 2004; Nielsen 2007).

Pierre Desrochers (2002) explique que le concept des chaînes alimentaires existe depuis très longtemps au sein du système industriel en affirmant que :

L'une des affirmations la plus assurée de certains spécialistes de l'écologie industrielle est que leur cadre conceptuel, qui met l'accent sur l'utilisation et la réutilisation des ressources, contraste fortement avec le système linéaire d'extraction, d'utilisation et de mise en décharge qui caractérise le développement industriel traditionnel. Malgré cette affirmation, de nombreuses preuves montrent

⁶ Traduction de l'auteur selon (Frosch and Gallopoulos 1989) :

[...] the recognition that the traditional model of industrial activity in which individual manufacturing processes take in raw materials and generate products to be sold plus waste to be disposed of should be transformed into a more integrated model: an industrial ecosystem. In such a system the consumption of energy and materials is optimized, waste generation is minimized and the effluents of one process [...] serve as the raw material for another process.

*que la récupération de ressources entre des entreprises n'ayant pas d'autres liens a probablement toujours été une caractéristique dominante de toute économie en développement.*⁷

Si le constat est juste, les raisons de ces collaborations étaient alors très différentes de celles qui nous occupent aujourd'hui. Les références qu'utilise Desrochers datent pour un grand nombre d'entre elles de l'époque où le transport des ressources était plus difficile et plus coûteux. Les liens qu'il mentionne, qui peuvent être considérés comme des symbioses industrielles, étaient obligatoires de par la faible disponibilité des ressources dans certaines régions du monde. Cette situation a fortement changé depuis la deuxième moitié du XX^e siècle et l'essor du système industriel globalisé. L'écologie industrielle, en se référant au domaine de l'écologie scientifique, recherche les solutions les plus efficaces pour la nature qui nous entoure et donc pour l'environnement, en tenant compte des limites de la planète.

C'est pour répondre aux enjeux environnementaux posés par la globalisation de l'économie et l'accès facilité aux ressources qu'émerge alors au début des années 1990, le concept de « parc éco-industriel », de l'anglais « eco-industrial park » (EIP), destiné à favoriser un développement éco-industriel au sein d'un groupe d'entreprises situées dans un espace géographique restreint. Ernest A. Lowe, Stephen R. Moran et Douglas B. Holmes (1996) donnent la définition suivante :

*Une communauté d'entreprises de production et de services recherchant l'accroissement de leur performance environnementale et économique à travers la collaboration dans les domaines du management environnemental et de l'usage des ressources incluant l'eau, l'énergie et les matériaux. En travaillant ensemble, la communauté génère un bénéfice collectif qui est supérieur à la somme des bénéfices issus de l'optimisation individuelle de chaque entreprise.*⁸

Nous retrouvons ici une référence directe au concept des synergies stratégiques inter-entreprises énoncé par Jean Belloti, mais à l'échelle géographique du parc industriel et en présentant sur un pied d'égalité les considérations économiques et environnementales. L'échelle du parc ou de la zone industrielle s'est imposée au départ comme un élément facile à étudier. Nous y reviendrons dans la Section 1.4.4. Le concept ne doit cependant pas être considéré uniquement comme une aire géographiquement confinée. Un parc éco-industriel peut très bien inclure une municipalité ou une ville voisine. Cette considération a participé à l'émergence du terme « réseau éco-industriel », terme généralement utilisé à l'échelle

⁷ Traduction de l'auteur selon (Desrochers 2002) :

One of the boldest statements of some industrial ecologists is that their intellectual framework, with its emphasis on the careful use and reuse of resources, stands in sharp contrast to the linear system of extraction, use and disposal that has characterized traditional industrial development. Despite such claims, much evidence is available showing that industrial resource recovery between otherwise unrelated firms has probably always been a dominant characteristic of all developing economies.

⁸ Traduction de l'auteur selon (Lowe, Moran et al. 1996) :

A community of manufacturing and service businesses seeking enhanced environmental and economic performance through collaboration in managing environmental and resource issues including energy, water, and materials. By working together, the community of businesses seeks a collective benefit that is greater than the sum of the individual benefits each company would realize if it optimized its individual performance only.

régionale. Le parc éco-industriel représente dès lors un cas particulier de réseau éco-industriel (Chertow 2000).

Le terme « symbioses industrielles », mentionné dans le titre de cette recherche, a émergé simultanément à celui de parc éco-industriel. Marian Chertow, dans son article de référence (Chertow 2000), en situe les origines au début des années 1990, lorsque la symbiose industrielle de Kalundborg, au Danemark, est décrite en détail (Tibbs 1993; Lowe et Evans 1995; Ehrenfeld et Gertler 1997; Erkman 1998). Les symbioses industrielles sont alors définies comme des échanges de matières et d'énergie entre entreprises voisines ou dispersées sur un territoire. Plus précisément, Marian Chertow (2000) explique que :

*La symbiose industrielle engage 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.*⁹

A nouveau, la recherche conclut que les interactions entre entités économiques permettent en général un gain d'efficacité, résultant de l'optimisation de l'usage des ressources et de la minimisation de la production des déchets (Korhonen 2002). De plus, dans le cas où les entreprises parviennent à générer un gain économique substantiel, les symbioses industrielles augmentent la compétitivité de l'ensemble de l'économie locale (Mirata et Emtairah 2005).

Plus récemment, un corrolaire a été ajouté par l'auteure à la première définition, jugée incomplète (Chertow 2007) :

*Ainsi, au moins trois entités différentes doivent être impliquées dans l'échange de au moins deux ressources différentes pour être reconnues comme un type basique de symbiose industrielle. En impliquant trois entités, qui ne doivent pas préalablement être engagées dans des activités de recyclage, la heuristique 3-2 commence à distinguer les relations complexes des échanges linéaires et uni-directionnels.*¹⁰

Ainsi, une symbiose industrielle se démarque des autres échanges de flux existants entre les différentes entités composant le système industriel. En particulier, les échanges entre une entité économique classique, l'entreprise, et une entité de recyclage ou recycleur ne sont pas considérés comme une symbiose industrielle à proprement parler. Un recycleur est une entreprise dont l'objectif premier est de

⁹ Traduction de l'auteur selon (Chertow 2000) :

Industrial symbiosis engages traditionally separate industries in a collective approach to competitive advantage involving physical exchange of materials, energy, water, and/or by-products. The keys to industrial symbiosis are collaboration and the synergistic possibilities offered by geographic proximity.

¹⁰ Traduction de l'auteur selon (Chertow 2007) :

Thus, at least three different entities must be involved in exchanging at least two different resources to be counted as a basic type of industrial symbiosis. By involving three entities, none of which is primarily engaged in a recycling-oriented business, the 3-2 heuristic begins to recognize complex relationships rather than linear one-way exchanges.

prendre en charge les déchets des entités économiques classiques. Leur raison d'être repose sur la nécessité de gérer les déchets produits par les autres entités économiques. La limite devient cependant plus floue lorsque qu'une entreprise de recyclage utilise un déchet spécifique pour la fabrication d'un produit qu'il peut à son tour commercialiser, permettant ainsi la réutilisation d'une ressource. Le terme de processeur de matériaux est alors préféré, mais sa position au sein du système industriel reste la même.

La littérature mentionne de nombreux cas dans lesquels les symbioses industrielles ne regroupent pas l'ensemble des échanges et collaborations possibles entre les entités économiques d'un territoire. Les travaux de René van Berkel, à Curtin University of Technology, en Australie, l'ont amené à proposer un élargissement de la définition sous le nom de *regional resources synergies* ou « synergies régionales de ressources », concept regroupant plusieurs solutions reconnues comme favorisant la maturation du système industriel. Publiée pour la première fois en 2005 (Bossilkov, van Berkel et al. 2005; van Berkel, van Beers et al. 2005), la définition des synergies régionales de ressources regroupe toutes les actions d'échange / collaboration pouvant être entreprises au sein d'une zone industrielle ou d'une région plus étendue :

Les synergies de co-produits : elles impliquent l'usage de co-produits préalablement rejetés par une entreprise par une autre [...]. Les co-produits peuvent être échangés en phase gazeuse, liquide ou solide, et peuvent provenir de procédés. [...]

Les synergies de services : elles impliquent l'usage partagé d'infrastructure, par exemple pour la production et le transport d'énergie, la production d'eau selon certains critères de qualité ou le traitement commun de certains déchets ou émissions. [...]

Les synergies d'approvisionnement : elles impliquent le positionnement d'une entreprise le plus proche possible de son principal client. ¹¹

En 2006, le concept des synergies d'approvisionnement sera encore élargi pour inclure la planification et le management des espaces libres et des équipements du territoire considéré (van Berkel, Bossilkov et al. 2006). Le concept se rapproche alors de celui des parcs éco-industriels (Lowe 1997; 2001). Différencier les concepts de synergies régionales de ressources, de symbioses industrielles et de parcs éco-industriels tient essentiellement à la dimension géographique du territoire considéré. Premièrement, les entreprises voisines qui sont situées dans un espace circonscrit, soit un parc ou une zone industrielle. Deuxièmement, les entreprises non voisines et troisièmement, les entreprises qui sont disséminées dans une région beaucoup plus étendue (Chertow 2000). Pour illustrer cette affirmation, la symbiose industrielle

¹¹ Traduction par l'auteur selon (van Berkel, van Beers et al. 2005) :

By-Product Synergies : these involve the use of previously disposed by-product from one facility by another facility to produce a valuable by-product [...]. The by-product can be exchanged on solid, liquid or gaseous state [...].

Utility Synergies : these involve the shared use of utility infrastructure, for example for the production of energy carriers, production of process water or for the joint treatment of waste and emissions. [...]

Supply Synergies : these involve the co-location of a company with its key customer.

de Kalundborg, détaillée dans la Section 1.4.6.1, est considérée comme appartenant au deuxième cas, soit des entreprises non voisines, mais proches géographiquement (Ehrenfeld et Gertler 1997).

Les actions telles que proposées par van Berkel ne peuvent pas être entreprises à toutes les échelles, ce qui l'a amené à proposer le schéma repris dans la Figure 8. Celui-ci indique que si les échanges de co-produits peuvent se pratiquer sur un territoire relativement vaste, en fonction de certains critères, le partage d'infrastructure est possible uniquement à l'échelle de la zone industrielle (Korhonen 2001; Lambert et Boons 2002; van Berkel, Bossilkov et al. 2006).

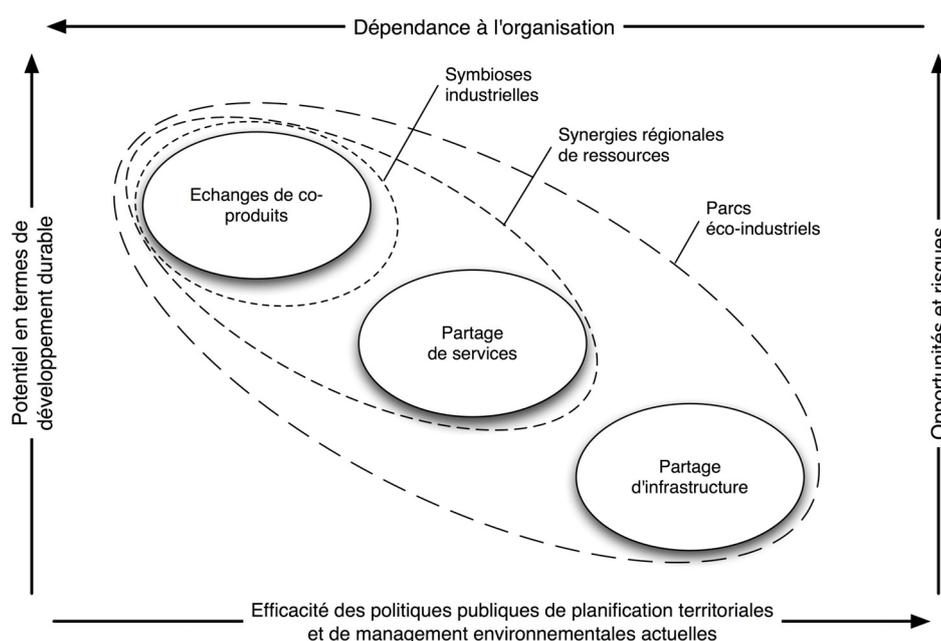


Figure 8 : Représentation des différents types de collaboration inter-entreprises pour la gestion des ressources en fonction des facteurs organisationnels, de risque, liés à leur potentiel et à leur efficacité.

Source : (van Berkel, Bossilkov et al. 2006).

Le schéma de la Figure 8 ne met cependant pas en évidence de manière claire l'importance de la dimension géographique des symbioses industrielles. Ainsi, nous proposons de le modifier afin de mettre en évidence les différents types de collaboration qui constituent une symbiose industrielle en fonction de l'échelle géographique considérée. La Figure 9 permet ainsi de définir ces échelles :

1. L'échelle du parc industriel ou de la zone industrielle : les distances (quelques kilomètres au maximum), permettent les échanges de co-produits, le partage d'infrastructures et le partage de services.
2. L'échelle des synergies régionales de ressources : il s'agit d'un territoire plus vaste que le cas précédent, par exemple plusieurs zones industrielles situées sur des communes voisines, ou, en

Suisse, l'échelle du canton. Les symbioses industrielles envisageables sont alors les échanges de co-produits et les partages de services. Les distances sont la plupart du temps trop importantes pour imaginer un partage d'infrastructure.

3. L'échelle des symbioses industrielles en général : à partir d'une certaine échelle géographique, seuls un nombre limité d'échanges de co-produits sont envisageables. En Suisse, il s'agit par exemple d'une échelle intercantonale.

Les considérations précédentes, qui concernent les échelles géographiques auxquelles se mettent en place les collaborations et traitent de la *dispersion* des entités économiques sur un territoire (et donc leur proximité relative), ne doivent pas être confondues avec l'utilisation qui est faite du terme *local* dans cette recherche. Le recours au terme local pour caractériser le cheminement d'une ressource est à mettre en opposition à celui de *global* qui caractérise une approche internationale et même intercontinentale de la gestion des ressources et des déchets. Par local, nous entendons ici *dans des limites géographiques permettant de minimiser les impacts sur l'environnement et d'assurer une efficacité optimale de l'utilisation des ressources et de la valorisation des déchets*. A ce moment, l'utilisation locale d'une ressource est choisie, et même imposée par les limites physiques, et non issue de considérations circonstancielles. Nous reviendrons sur cette notion dans la Section 2.4.4.

L'objectif du présent travail n'est cependant pas de concilier toutes les définitions et concepts qui ont émergés et ne manqueront pas d'apparaître encore à l'avenir. Il existe néanmoins un consensus autour du terme anglais « *Industrial Symbiosis* » pour décrire l'ensemble des opportunités liées à l'optimisation de l'usage des ressources par l'intermédiaire de collaboration inter-entreprises. Nous avons choisi de le traduire par le terme *symbiose industrielle*. Dans certains cas, les synonymes *synergie industrielle* ou *synergie éco-industrielle* sont également employés.

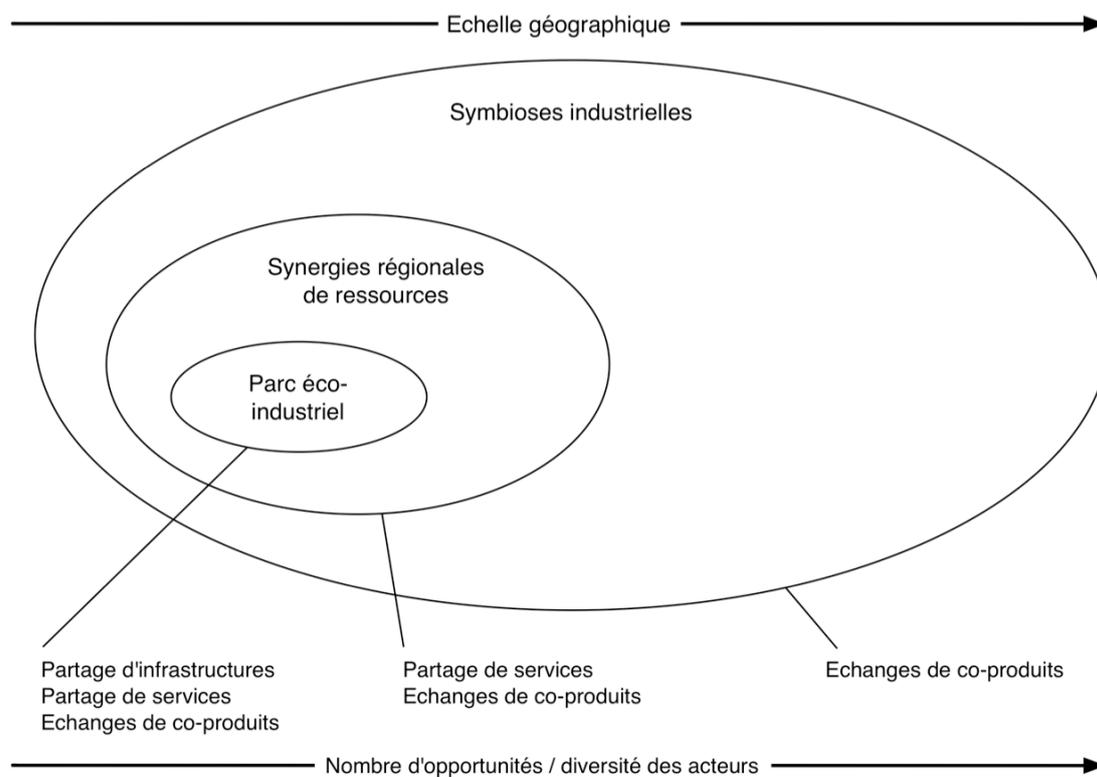


Figure 9 : Les différents types de symbioses industrielles en fonction de l'échelle géographique. Source : auteur.

1.4.3.1 *Les composantes d'une symbiose industrielle*

Pour résumer la revue de littérature précédente, le concept central des symbioses industrielles est la création de collaborations entre plusieurs entreprises présentes dans un espace géographique défini. Les symbioses industrielles permettent de dépasser les limites de l'entreprise en s'intéressant aux relations inter-entreprises et à la relation entre l'entreprise et son environnement économique proche. Leur mise en oeuvre nécessite, en premier lieu, un climat de confiance et de partage d'expériences et d'informations entre des entités économiques géographiquement proches afin de fédérer celles-ci autour de projets de grande envergure ou de simples économies d'échelle. Ainsi, le premier élément indispensable à toute collaboration est la mise en place de nouveaux flux d'informations et de communication entre les entreprises considérées. Ce sont les échanges d'informations, en participant à l'essor de lien de confiance entre les acteurs économiques, qui vont donner naissance aux opportunités de collaboration. Certaines entreprises sont plus avancées que d'autres dans la connaissance des flux de matière et d'énergie et des impacts environnementaux liés à leurs processus de production. La mise en place d'échanges d'informations apparaît comme la manière la plus directe de favoriser la diffusion de expériences réussies au sein des entités économiques d'un territoire.

En s'appuyant sur ces échanges d'informations, il est possible de mettre en oeuvre des échanges de co-produits (matières, eau, énergie) ; les déchets d'une entreprise devenant la matière première d'une autre. Cet échange peut être soit direct, soit se produire par l'entremise d'un intermédiaire (ce terme est défini dans la Section 1.6.1.3). Ce dernier peut prendre la forme d'un transport, d'un traitement ou d'un conditionnement intervenant avant la réutilisation par une autre entreprise. Dans le milieu académique, cette possibilité a été plusieurs fois discutée et certains auteurs excluent les intermédiaires et les recycleurs des symbioses industrielles. Il ne s'agit pas ici de polémiquer sur la position du recycleur dans le système industriel, mais simplement de chercher à promouvoir la réutilisation (ce terme est défini dans la Section 1.5.1.1) et les solutions d'utilisation et de valorisation des ressources permettant de minimiser les impacts environnementaux. Une solution *optimale* est donc celle qui minimise les impacts environnementaux.

Finalement, la mutualisation de l'approvisionnement en matières premières et en produits manufacturés, la mutualisation de la collecte des co-produits entre industriels voisins et le partage d'infrastructures de production et de traitement sont également considérés. Le partage d'infrastructures pour la production centralisée de certains flux (essentiellement l'énergie) et le traitement de co-produits spécifiques en vue de leur réutilisation permettent également de minimiser les impacts sur l'environnement.

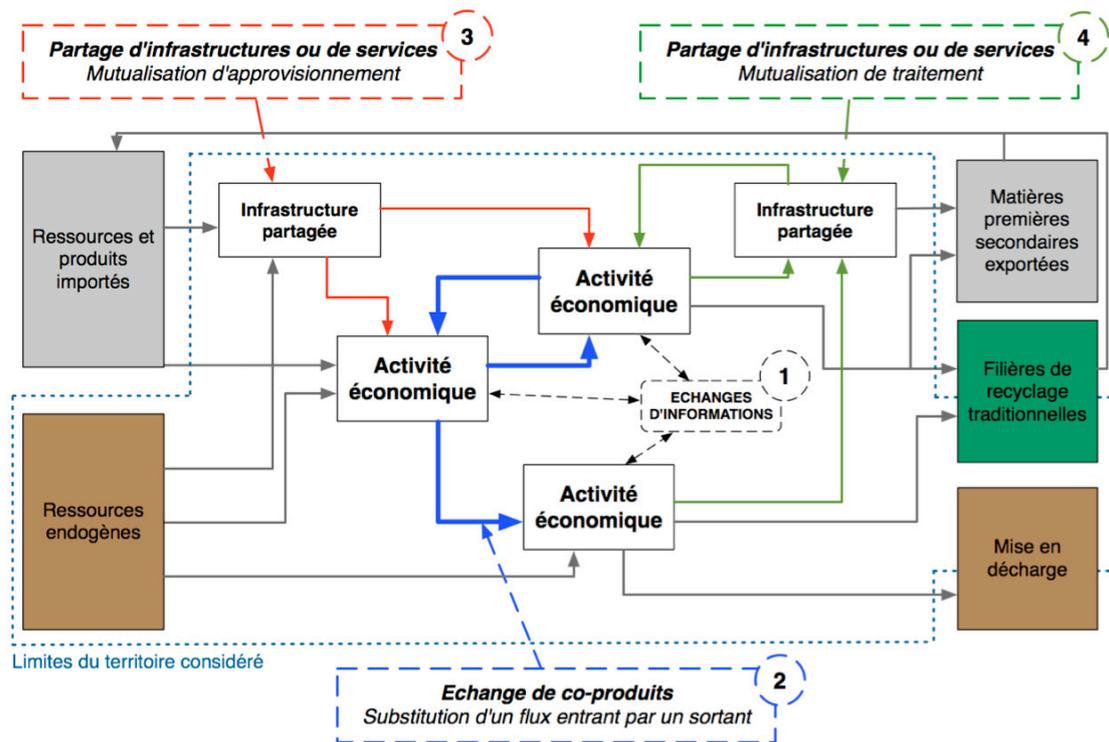


Figure 10 : Représentation des quatre types de symbioses industrielles considérés et leur influence sur le cheminement classique des flux de matière et d'énergie. Source : auteur, inspiré de (Adoue 2007).

La Figure 10 représente l'ensemble des opportunités proposées par les symbioses industrielles :

1. L'**échange d'informations et d'expériences** sur les bonnes pratiques dans le domaine de la gestion des ressources et des flux de matière ;
2. La création de **réseaux d'échanges de co-produits** (matières, eau, énergie) permettant la réutilisation - valorisation d'un déchet par une autre entreprise (soit directement, soit par l'intermédiaire d'un tiers opérateur) ;
3. La **mutualisation de certains services** comme l'approvisionnement en matières premières et produits manufacturés et la collecte des déchets ;
4. Le **partage d'infrastructures** pour l'exploitation de certaines ressources renouvelables endogènes ou la transformation centralisée de certains flux (essentiellement l'énergie), ainsi que pour la valorisation de déchets spécifiques.

Le quatrième type de symbiose industrielle introduit la notion de *ressource endogène*. Le terme endogène qualifie une ressource naturelle directement disponible à l'échelle géographique considérée (par exemple le territoire du canton de Genève, qui sert d'étude de cas pour cette recherche). Par opposition, le terme *exogène* qualifie une ressource qui est importée. Dans les deux cas, les ressources peuvent être

renouvelables ou non. Il est intéressant de souligner ici qu'il apparaît comme nécessaire d'inclure les ressources endogènes et renouvelables du territoire dans une réflexion concernant les symbioses industrielles. Dans certains cas, il pourrait en effet être préférable de substituer une ressource importée non renouvelable par une ressource endogène renouvelable, plutôt que de favoriser sa réutilisation. Nous parlons alors de *substitution de ressource*. Cependant, si le territoire concerné est vaste, un grand nombre de ressources seront alors considérées comme endogène, ce qui affaiblira le sens de cette notion. La Figure 10 fait donc mention des ressources naturelles directement disponibles dans les limites du système. Nous reviendrons sur ces considérations dans la Section 1.5.1 traitant de l'ensemble des méthodes permettant d'améliorer l'utilisation des ressources.

Pour conclure cette section de revue de littérature et de définition, il est possible d'affirmer que les symbioses industrielles proposent des solutions s'appuyant directement sur le tissu économique du territoire considéré. Elles permettent de :

- Favoriser une utilisation efficace des ressources en améliorant la circulation des flux de matière et d'énergie au sein du système industriel et en favorisant l'essor de filières de valorisation permettant de minimiser les impacts environnementaux ;
- Favoriser l'utilisation des ressources endogènes, renouvelables ou non, et la réutilisation à l'échelle locale afin de minimiser les émissions dues aux transports.

Les symbioses industrielles, au sens de l'écologie industrielle, ont donc pour objectif d'améliorer l'utilisation des ressources et de réduire les impacts environnementaux des activités économiques, tout en générant une marge bénéficiaire pour les acteurs qui y prennent part.

Cela permet de différencier les symbioses industrielles d'une part des synergies inter-entreprises décrites par Jean Belotti (Belotti 2005), dont les seuls objectifs sont organisationnels et financiers, et, d'autre part, des filières de gestion des déchets existantes il y a plusieurs décennies, avant la globalisation du commerce et de l'utilisation des ressources (Desrochers 2002). L'organisation de ceux-ci était conditionnée par la rareté des ressources et les coûts importants des transports et non par souci de la protection de l'environnement.

En plus des considérations environnementales et économiques, elles présentent également des bénéfices collatéraux sociaux et humains. Nous y reviendrons dans les sections 2.6.3 et 2.6.4 traitant de la perception des symbioses industrielles par les entreprises et les pouvoirs publics.

Finalement, il est important de préciser que les symbioses industrielles ne sont pas une fin en soi. Elles participent à un ensemble de méthodologies et procédures (qui sont détaillées dans la Section 1.5.1) dont l'objectif est de rapprocher le système industriel du fonctionnement des écosystèmes naturels, dans le but de le rendre viable à long terme.

1.4.3.2 Terminologie utilisée pour décrire une ressource et un déchet

Les différentes citations utilisées précédemment contiennent plusieurs termes destinés à définir ce que sont une *ressource* ou un *flux* de matière ou d'énergie dans le contexte d'une symbiose industrielle. Dans cette recherche, une ressource est un flux de matière et d'énergie nécessaire à une activité économique. Le terme regroupe donc les ressources naturelles (sous la forme de matières premières), mais également toutes les substances qui en sont dérivées, comme les produits intermédiaires (comme un combustible fossile et l'eau, nécessaire pour générer de la vapeur). Les déchets, ou éléments sortant d'un procédé de production, sont alors également considérés comme des ressources. Cependant, ils n'ont pas tous la même valeur économique, ce qui influence grandement leur devenir et les possibilités de valorisation. Il est donc possible de faire une classification des déchets selon leur valeur marchande par rapport à leurs équivalents neufs. La classification proposée par (Lambert 2001) et reprise par (Zhu et Côté 2004) pour une étude de cas du Guitang Group, en Chine, est utilisée comme référence pour ce travail. Lambert (2001) classe en quatre catégories les flux de matière sortant des procédés de production et de transformation d'une entité économique (Figure 11) :

1. Les *produits* sont les sortants désirés par l'entité productrice. Ils représentent la plus grande valeur ajoutée. Un produit peut être utilisé comme produit intermédiaire ou auxiliaire pour d'autres procédés de production ou être destiné à la consommation ;
2. Les *co-produits*, fabriqués dans la plupart des cas de manière non intentionnelle, présentent une valeur économique substantielle. Elle est du même ordre de grandeur que celle du même produit neuf ;
3. Un *sous-produit* possède une valeur économique plus faible que le co-produit, bien que toujours positive. Sa valeur spécifique est généralement considérée inférieure à la valeur originelle de la matière première ;
4. Un *produit résiduel* est l'ensemble des émissions résiduelles des procédés, ce qui inclut les émissions dans l'atmosphère, le sol et l'eau. Les produits résiduels ont généralement une valeur économique négative, impliquant que l'entité économique paie pour s'en débarrasser. Dans certains cas, la transformation de ces résidus peut augmenter leur valeur marchande, comme dans le cas du compostage ou de la production de biogaz. Dans certains cas, ils sont également nommés *flux fatals*.

Dans le cas des symbioses industrielles, il est intéressant de concentrer les efforts :

- Sur la valorisation de co-produits et des sous-produits, tout en réduisant la production de produits résiduels ;

- Sur les matières et services auxiliaires. Les *flux génériques*, par exemple le mazout utilisé pour la production de vapeur, peuvent parfois plus facilement être substitués ou leur approvisionnement mutualisés.

Les termes co-produits, sous-produits et produits résiduels peuvent être regroupés dans une appellation de *matières premières secondaires* car il est parfois possible de les réutiliser.

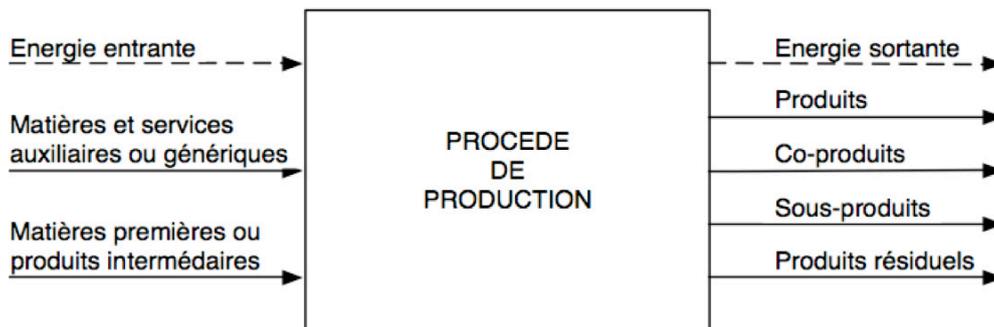


Figure 11 : Schéma des flux de matière et d'énergie dans un procédé de production. Source : (Lambert 2001).

1.4.4 Les parcs éco-industriels

Nous avons mentionné précédemment que certains types de symbioses industrielles sont réalisables uniquement lorsque la proximité entre activités économiques est grande, comme dans une zone ou un parc industriel. Le concept des parcs éco-industriels est cependant plus large que les seules symbioses industrielles telles que définies précédemment. Raymond P. Côté et J. Hall donnent la définition suivante (1995) d'un parc éco-industriel :

De nombreux objectifs peuvent être identifiés pour l'application d'une approche écologique du design et du fonctionnement des parcs industriels. Parmi les plus pertinents, nous voudrions considérer :

- *La conservation des ressources naturelles et économiques ;*
- *La réduction des coûts de production liés à la consommation de ressources, d'énergie, aux assurances, aux traitements des co-produits, ainsi que sa responsabilité ;*
- *L'amélioration de l'efficacité opérationnelle, la qualité, la santé des employés et son image publique ;*

- *L'identification des opportunités de valorisation économique de ses déchets.*¹²

Raymond P. Côté et Edward Cohen-Rosenthal (1998) précisent les éléments contenus dans cette première définition à partir de citations de différents auteurs précurseurs dans le domaine de l'écologie industrielle, en insistant sur le fait qu'ils permettent d'intégrer les trois piliers du développement durable. Nous retiendrons les éléments suivants pour accompagner les définitions précédentes et définir les orientations possibles lors de la conception de parcs éco-industriels :

1. La construction de bâtiments et d'infrastructures à haute performance environnementale (Minergie, par ex.), utilisant les ressources et énergies renouvelables disponibles localement ;
2. L'optimisation de l'usage des ressources par le partage de co-produits et d'approvisionnement grâce à la mise en place d'un réseau d'échange et la mutualisation de services et d'infrastructures (matières premières et déchets) ;
3. La présence d'entreprises travaillant dans le domaine des technologies et des services environnementaux ;
4. La présence d'entreprises proposant des produits écologiques ou durables ;
5. Une mixité de développement industriel, commercial et résidentiel.

Le concept de parc éco-industriel considère ainsi des éléments autres que les symbioses industrielles, même si ces dernières sont un élément central des projets en cours actuellement dans le monde (Section 1.4.6).

1.4.5 Le développement éco-industriel

Ainsi, l'écologie industrielle et en particulier les symbioses industrielles proposent des méthodologies et des outils permettant de favoriser le développement durable d'un territoire. En intensifiant les connexions entre activités économiques, les symbioses industrielles permettent de réduire la consommation de ressources et les impacts sur l'environnement tout en améliorant la compétitivité économique d'un territoire (Ehrenfeld et Gertler 1997; Mirata 2005). Selon Fredrik Burström et Jouni Korhonen (2001) :

Les bénéfices environnementaux de l'écologie industrielle se trouvent dans la réduction de la consommation de matières premières et d'énergie dans le système industriel et dans la diminution

¹² Traduction de l'auteur selon (Côté and Hall 1995) :

Many different objectives can be identified for the application of an ecological approach to the design and operation of industrial parks. Among the more relevant, we would include:

- conservation of natural and financial resources • reduced production, material, energy, insurance and treatment costs and liabilities
- improved operating efficiency, quality, population health and public image
- potential income through the sale of waste materials.

*des déchets et des émissions. Dans un écosystème industriel réussi, les gains économiques proviennent de la réduction des coûts liés aux matières premières, à l'énergie et à la gestion des déchets résultant de la législation environnementale, ainsi que de l'amélioration de l'image environnementale et des potentiels en matière de « marché vert ».*¹³

Pour approcher l'évolution d'un territoire dans son ensemble, le terme *développement éco-industriel* est apparu parallèlement au concept des parcs éco-industriels. Selon Edward Cohen-Rosenthal (2003), il permet de mieux ancrer les entreprises dans leur environnement, de réduire leurs impacts sur l'environnement, de créer des emplois et de favoriser de bonnes conditions de travail. Considérant une échelle géographique plus large que celle du parc éco-industriel, il permet ainsi de faire le lien entre le développement économique et industriel et la gestion de l'environnement. Son échelle géographique dépasse celle du parc pour considérer les entreprises individuelles dans leur environnement, soit une municipalité, une ville, une région ou un pays. Edward Cohen-Rosenthal (2003) fait d'ailleurs le lien entre l'organisation de certaines grandes entreprises et le fonctionnement de systèmes villageois dans certaines régions rurales et pays en voie de développement. Dans ces derniers, les relations entre individus permettent de rediriger les déchets vers des filières de réutilisation et de tenir des inventaires de la consommation de ressources, principalement à cause de l'accès limité à certaines ressources.

Aujourd'hui, le développement et l'organisation du territoire sont essentiellement du ressort des collectivités publiques. Leur approche de la problématique environnementale ne se limite pas seulement aux zones industrielles. Une approche à une échelle géographique plus large permet d'accroître le nombre d'opportunités (Sterr et Ott 2004). Lorsqu'un territoire décide de réhabiliter d'anciens terrains industriels, d'étendre des zones existantes ou d'en créer de nouvelles, l'objectif premier est le développement économique de la région. Lorsque ces activités intègrent des considérations liées à la gestion des ressources, nous pouvons alors parler de développement éco-industriel, ce qui implique une nouvelle approche de l'urbanisme et de la dispersion des entités économiques sur le territoire considéré.

Pour occuper ces espaces, les pouvoirs publics, aux différentes échelles géographiques, sont constamment à la recherche de nouvelles activités économiques désireuses de venir s'installer sur leur territoire. Cette activité permet aux collectivités de proposer de nouveaux emplois et d'augmenter les revenus issus des taxes et des impôts. Depuis le début des années 2000, certaines collectivités publiques incluent dans leur réflexion des aspects liés au développement durable. Dans le contexte de l'optimisation des flux de matière et d'énergie, le développement éco-industriel ne représente pas seulement une manière d'augmenter leur éco-efficacité, mais est également perçu comme une nouvelle forme de développement aux échelles locales et régionales (Deutz et Gibbs 2004). Dans certains cas, il intègre

¹³ Traduction de l'auteur selon (Burström and Korhonen 2001) :

The environmental benefits of IE are to be found in the reduction of virgin material and energy inputs to the industrial system, and of waste and emission outputs from the system. In a successful industrial ecosystem the economic gains lie in the reduction of raw material and energy costs, waste management costs and costs resulting from environmental legislation, as well as the improvement of 'environmental image' and 'green market' potential.

également des considérations liées aux conditions de travail et plus généralement à la qualité de vie, une dimension qui est encore rarement prise en compte dans le développement durable et l'écologie industrielle (Cohen-Rosenthal 2004).

En conclusion, le développement éco-industriel englobe les concepts des parcs éco-industriels et des symbioses industrielles. Cependant, il considère d'une part une échelle géographique plus large que celle du parc et d'autre part, il intègre les considérations relatives au développement économique et industriel. Nous verrons plus tard dans ce travail que l'écologie industrielle peut être intégrée dans les activités des organes de promotion du territoire, soit pour soutenir les entreprises déjà implantées (promotion économique endogène), soit pour en attirer de nouvelles (promotion économique exogène).

1.4.6 Les symbioses industrielles dans le monde

Depuis les années nonante et la découverte de la symbiose industrielle de Kalundborg au Danemark, plusieurs dizaines d'expériences ont été révélées aux quatre coins de la planète. Cette section propose une revue de la littérature existante. Certains projets, plus détaillés, ont été visités lors de déplacements internationaux réalisés entre 2005 et 2010. Les projets identifiés sont classés par continent pour faciliter leur présentation.

Les expériences citées ou présentées dans cette section ne constituent pas une liste exhaustive. Le concept des symbioses industrielles est en fort développement et toutes les expériences existantes ne sont pas documentées, de nombreux projets ne portant pas le nom de symbioses industrielles.

Actuellement, seule la base de données en ligne de l'Université de Curtin en Australie permet d'accéder publiquement à des informations ¹⁴, mais la base de données des parcs éco-industriels développée par Chris Davis, de l'Université de Delft en Hollande devrait prochainement accroître la visibilité de nombreux projets (Davis, Nikolic et al. 2010). Une énumération des projets identifiés par continent est proposée en Annexe 1.

Les développements présentés dans les chapitres suivants s'appuient en particulier sur un petit nombre de projets détaillés dans les prochaines sections. Les approches utilisées pour ces projets varient fortement, peu d'études comparent les actions entreprises et le contexte dans lequel elles ont été menées. Benoit Duret (2007) propose un retour d'expérience de plusieurs projets européens et nord américain. Dans le cadre de cette recherche, nous avons participé à une recherche destinée à comparer le contexte législatif des projets menés au Royaume-Uni, au Danemark, au Portugal et en Suisse (Costa, Massard et al. 2010).

¹⁴ <http://www.csrp.com.au/database/index.html>, site consulté le 4 septembre 2009.

1.4.6.1 *Kalundborg, Danemark*

La symbiose industrielle de Kalundborg, au Danemark est le premier projet de développement éco-industriel détecté par les chercheurs du très jeune champ de recherche qu'est l'écologie industrielle au début des années nonante. En fait, les premiers à s'être intéressés au projet sont les médias. A la fin des années quatre-vingt, un journaliste du Financial Times s'est rendu à Kalundborg et a publié un article à son propos (Erkman 1997). Suite à cela, un groupe de chercheurs s'est penché sur ce cas particulier de collaboration entre entreprises. La symbiose de Kalundborg qui existe depuis les années soixantes n'a ainsi été documentée qu'au début des années nonante (Tibbs 1993; Lowe et Evans 1995; Erkman 1997; Côté et Cohen-Rosenthal 1998). La publication de référence reste cependant celle publiée dans le premier numéro du Journal of Industrial Ecology et qui détaille l'organisation de l'écosystème industriel alors « découvert » à Kalundborg. Les quatre principales entreprises de cette ville côtière de 20'000 habitants sont : une centrale thermique (Asnaes), une raffinerie de pétrole (Statoil), un fabricant d'enzymes et de produits pharmaceutiques (Novo Nordisk, aujourd'hui divisé en deux entités Novo Nordisk et Novozymes) et un fabricant de panneaux de gypse (Gyproc). Ils sont associés à certains services de la municipalité pour échanger des flux de matière et d'énergie. Un certain nombre d'autres entités extérieures à la zone, participent également aux échanges en recevant des co-produits qu'ils utilisent comme matière première pour leurs activités (Ehrenfeld et Gertler 1997).

Le réseau d'échange de co-produits de Kalundborg ne s'est pas créé en un jour, ni même en un an, mais il s'est développé sur plus de trente-cinq ans. Son objectif est de retirer un bénéfice économique des co-produits et de minimiser les coûts de traitement imposés par les nouvelles et très strictes lois environnementales danoises. La mise en place des échanges est donc basée d'une part sur la maximisation des bénéfices grâce à l'usage rationnel des ressources et en particulier de l'énergie, ainsi que sur la nécessité de diversifier l'approvisionnement en eau, plutôt que sur des objectifs de réduction des impacts environnementaux (Jacobsen 2006). Ces deux objectifs sont cependant liés car la création de la Symbiose de Kalundborg coïncide avec l'émergence du principe du pollueur / payeur dans la législation danoise.

Il est important de relever qu'aucun mécanisme institutionnel n'a été créé ou utilisé à Kalundborg pour promouvoir les échanges de co-produits et faciliter la communication entre les entités économiques. Les liens de confiance entre les partenaires existaient avant la mise en place des premiers échanges (Ehrenfeld et Gertler 1997). En résumé, il s'agit donc d'un processus spontané, reposant sur la confiance mutuelle existant entre quelques grandes entités du secteur secondaire à la fois différentes et complémentaires (Erkman 1998). Le nom de symbiose industrielle, utilisé par les acteurs du projet depuis 1989, a ainsi été énoncé pour la première fois lors d'une rencontre informelle entre les dirigeants des différentes entités.

1.4.6.2 *National Industrial Symbiosis Program (NISP), Royaume-Uni*

En 2000, le Business Council for Sustainable Development, branche du Royaume-Uni (BCSD-UK), s'engage en faveur de l'écologie industrielle en assurant la coordination des projets de développement éco-industriel et plus particulièrement de symbioses industrielles dans la région de Yorkshire et Humber, au nord-est de l'Angleterre. Les succès obtenus en Angleterre, ajoutés à l'intérêt croissant des pouvoirs publics au niveau régional et national incitent le BCSD-UK à soutenir l'émergence de nouveaux programmes sur l'ensemble du territoire national et à créer un programme national : le National Industrial Symbiosis Program (NISP), qui sert de parapluie aux programmes régionaux et qui facilite les échanges d'informations entre régions en les conseillant. Le Royaume-Uni est ainsi devenu le premier pays à disposer d'un programme national, impliquant les quatre grandes régions du pays, soit l'Angleterre, le Pays de Galles, l'Ecosse et l'Irlande du Nord (Mirata 2004).

En Angleterre, le NISP est essentiellement financé par l'intermédiaire du Business Resource Efficiency and Waste programme (BREW), créé pour réinvestir le montant de la taxe de mise en décharge dans l'économie (Phillips, Barnes et al. 2006). Les objectifs du NISP sont d'augmenter la réutilisation et le recyclage de co-produits, sous-produits et produits résiduels par la mise en place de réseaux d'échange et de valorisation. En 2007, ce programme a permis de valoriser 1,7 million de tonnes de déchets en évitant leur mise en décharge et a permis aux entreprises concernées d'économiser 70 millions de livres sterling (DEFRA 2007).

Premier programme régional initié en 2000, le Humber Industrial Symbiosis Programme (HISP) regroupe plusieurs dizaines d'entreprises autour de divers projets de mutualisation de production et de distribution d'énergie, d'échange de produits chimiques entre plusieurs acteurs de cette industrie et d'autres secteurs d'activité (Mirata 2004). Néanmoins, les projets mis en place par le NISP ne se limitent pas à la mise en place de symbioses industrielles et les études de cas disponibles sur le site internet du programme rendent compte de projets qui concernent la mise en place de nouvelles filières de recyclage et de valorisation énergétique ¹⁵.

1.4.6.3 *Guitang Group, Chine*

La symbiose du Guitang Group, organisée autour d'une manufacture de sucre située dans la région autonome chinoise de Guangxi Zhuang, dans le centre-sud de la Chine, est un autre exemple de développement autonome de symbioses industrielles. Il s'agit par contre d'une seule entité juridique, publique, mais pratiquant plusieurs activités industrielles basées sur les co-produits de la canne à sucre. L'entité publique Guitang Group, créée en 1954, est aujourd'hui constituée d'une raffinerie de sucre, d'une usine de pulpe à papier, d'une usine de production de papier, d'une fabrique d'alcool, d'une cimenterie et d'une usine produisant des fertilisants. L'ensemble des activités produit annuellement 120'000 tonnes de

¹⁵ <http://www.nisp.org.uk>, site consulté le 12 février 2009.

sucré, 85'000 tonnes de papier, 10'000 tonnes d'alcool, 330'000 tonnes de ciment, 8'000 tonnes d'alcali (composés alcalins) et 30'000 tonnes de fertilisants (Zhu et Côté 2004; Geng, Haight et al. 2007).

Depuis plusieurs décennies, la stratégie du groupe se base sur trois piliers. Premièrement, il maintient des relations étroites avec les producteurs de matière première (la canne à sucre) pour sécuriser son approvisionnement. Deuxièmement, il produit du sucre de qualité irréprochable pour augmenter ses parts de marché et générer des bénéfices financiers. Troisièmement, il cherche à bénéficier de tous les avantages de la production de canne à sucre en développant de nouvelles activités économiques pouvant réutiliser les co-produits, sous-produits et produits résiduels issus de la canne à sucre. Cette stratégie a permis à l'entreprise de diversifier ses activités et de créer les nombreuses symbioses industrielles. Celles-ci sont essentiellement orientées autour des deux principaux co-produits de la production de sucre à partir de canne à sucre : la molasse et la bagasse (Zhu et Côté 2004; Zuh, Lowe et al. 2007).

1.4.6.4 *Projet Eco-town, Japon*

Le Japon a ratifié en 2000 une loi destinée à favoriser le recyclage (Basic Law for Establishing a Recycling-Based Society). L'année 2000 est prise comme référence et les objectifs à l'horizon 2010 sont d'augmenter la productivité des ressources de 40% (soit 390'000 JPY par tonne), le taux de recyclage de 40% (soit 14% du TMR), et de diminuer la quantité de matériaux mis en décharge de 50% (pour atteindre un maximum de 28 millions de tonnes par an). Un des programmes mis en place pour atteindre ces objectifs s'appelle « Eco-Town ». Il a été inauguré en 2001 et son objectif est double : augmenter la durée de vie des décharges existantes et revitaliser le tissu industriel au niveau local. Dans ce but, il combine planification territoriale et industrielle, mise en place d'activités de recyclage novatrices et d'action sociale et de conciliation. Le programme, financé par deux ministères du gouvernement au niveau national (MoE et METI) et les autorités locales, permet aux entreprises privées désireuses d'investir dans la construction et l'opération d'installations de recyclage d'obtenir des aides financières (en moyenne 36% du coût total du projet). Plus largement, le projet implique également la mise en place d'échanges de co-produits. Entre 1997 et 2007, 26 projets « Eco-Town » ont été mis en place et soutenus financièrement sur l'ensemble du territoire japonais, ce qui a permis la construction de 61 installations de recyclage d'une capacité totale de 2 millions de tonnes par an. Les principales installations concernent la production de combustibles et de matériaux de substitution, le démantèlement et le recyclage d'automobiles, le recyclage du verre, de métaux, du papier, de plastiques et de matériaux de construction, le traitement intermédiaire de déchets solides urbains, la méthanisation de déchets organiques, la valorisation du bois usagée et la gestion des déchets électroniques (van Berkel, Fujita et al. 2009).

L'« Eco-Town » de la ville de Kawasaki, zone fortement industrialisée, située à l'extrémité ouest de la baie de Tokyo est une des premières à avoir vu le jour en 1997. Le projet concentre à lui seul 21% des subsides attribués au niveau national. Aujourd'hui, 14 synergies impliquent des entités économiques dans les secteurs du ciment, de l'acier, de la chimie et du papier, ainsi que les activités de recyclage associées.

En particulier, 5 symbioses industrielles et 2 partages d'infrastructure ont été mis en place. Les 7 autres échanges concernent de nouvelles activités de recyclage. Les synergies sont essentiellement des échanges d'eau, de chaleur résiduelle, de fragments de métaux, et de boues issues de la production de papier ; elles permettent d'éviter la mise en décharge de 565'000 tonnes de déchets par an (van Berkel, Fujita et al. 2009; van Berkel, Fujita et al. 2009).

1.4.6.5 *Le programme national coréen*

Le Korean National Cleaner Production Center (KNCPC) fait partie du réseau de centre de production plus propre soutenu par l'ONUDI et l'PNUE. Depuis sa création, il contribue au développement de la législation environnementale coréenne, ainsi qu'à la mise en place de procédures de production plus propres. En 1995, le Ministère du commerce, de l'industrie et de l'énergie a promulgué une loi destinée à promouvoir une transition vers une structure industrielle respectueuse de l'environnement. Elle a marqué le point de départ du programme coréen de production plus propre, géré conjointement avec le Korean Institute of Industrial Technology (KITECH).

Depuis, le KNCPC propose des financements et des formations pour aider les entreprises à diminuer les impacts environnementaux de leurs infrastructures et activités et pour communiquer sur leurs bonnes pratiques. Il soutient également l'élaboration de stratégies à moyen et long terme pour certains secteurs d'activité et le développement de parcs éco-industriels.

Depuis les années nonante, le KNCPC a élaboré un plan national pour l'établissement de parcs éco-industriel en Corée. L'objectif de ce programme est de mettre en oeuvre un modèle de développement industriel durable pour 2020. Les trois phases proposées sont décrites à la Figure 12.

Grâce à trois phases planifiées entre 2005 et 2019, il doit aboutir à un modèle national de développement éco-industriel basé sur un nombre croissant d'expériences pilotes. Au cours d'une visite en Corée en 2006, j'ai pu observer la mise en oeuvre de la phase 1. Cinq parcs éco-industriels étaient en cours de développement et les projets impliquaient :

- Une analyse des flux de matière et d'énergie à l'échelle de chaque parc ;
- Une évaluation du potentiel de production plus propre ;
- L'organisation d'échanges de co-produits et de mutualisation de services ;
- L'introduction de systèmes de management environnemental dans les entreprises ;
- La construction d'une base de données coréenne des parcs éco-industriels et la modélisation des parcs ;
- La mise en place de programmes d'enseignement, de sensibilisation et de soutien aux entreprises.

Phase	Objectives	Scope	Term	Remark
Phase 1	EIP infrastructure of existing IP	Eco-networking between plants for 5 national industrial parks	2005-2009 (5y)	-Trial project for national industrial parks
Phase 2	Spreading EIPs' Success story	Transfer and Dissemination to other industrial parks	2010-2014 (5y)	-Involving local and agro-industrial parks
Phase 3	EIP Design (Zero emission IP)	EIP design on the basis of industrial ecology	2015-2019 (5y)	-Korean model for EIP

Figure 12 : Les trois phases du plan coréen de développement de parcs éco-industriels. Source : (KNPC 2005)

Lorsque s'est tenue la 4th International Conference on Eco-Industrial Parks, en 2006, cinq parcs éco-industriels avaient été définis comme projets pilotes : Mipo – Onsan (automobile et pétrochimie), Yeosu (pétrochimie et production d'énergie), Pohang (production d'acier, de ciment et traitement des déchets), Banwol – Siwha (textile, teinture et production de papier), Jinhae – Haman – Jinju (travail des métaux non ferreux, acier, production de machines, textile, production de papier et industrie pétrochimique). Le Research Institute of Industrial Science and Technology (RIST) étaient alors en charge de la modélisation des parcs et du développement d'une base de données sur les flux de matière et d'énergie. A ce moment, des besoins importants pour des outils de modélisation, de stockage et de gestion des données ont été énoncés. La plupart des parcs présentés au cours de la conférence développent d'ailleurs leurs propres outils. Depuis 2006, plusieurs publications académiques ont permis de suivre le développement du projet (Kim 2002; Kang 2006; Park et Won 2007; Park, Rene et al. 2008).

1.4.6.6 Kwinana, Australie

La zone industrielle de Kwinana est située à 40 km au sud de la ville de Perth, dans la région de Western Australia. C'est un centre industriel important pour toute la région, il regroupe de nombreuses activités liées à l'industrie extractive (Alcoa, Kwinana Nickel Refinery, Hismelt, Cockburn Ciment), à l'industrie pétrolière (BP oil refinery) et à l'industrie chimique (Tiwest, CSBP, Coogee Chemicals, Nufarm, Bayer, Chemeq, Ciba, Nalco), il est équipé de deux centrales thermiques et deux unités de cogénération (van Beers, Corder et al. 2007).

Pour répondre aux nouvelles législations environnementales australiennes, le Kwinana Industry Council (KIC), regroupant des principales entreprises de la zone, a été créé en 1991. Parallèlement à cela, le

Centre for Sustainable Resource Processing (CSRP) de l'Université de Curtin, financé conjointement par les entreprises du secteur de l'extraction des matières premières et les pouvoirs publics régionaux et nationaux, joue le rôle de plateforme technique et scientifique pour améliorer la durabilité de l'industrie extractive. Si plusieurs collaborations existaient déjà de longue date à Kwinana, le CSRP s'attèle à en détecter et mettre en place de nouvelles. C'est d'ailleurs pour caractériser les projets existants et les opportunités détectées à Kwinana que le terme « synergies régionales de ressource » a été créé (van Berkel, Bossilkov et al. 2006). Si l'on se réfère à la Section 1.4.3, le terme est aujourd'hui synonyme de symbioses industrielles au sens large. Le CSRP a développé une méthodologie qui permet la détection de nouvelles opportunités, ainsi qu'une base de données destinée au stockage des données récoltées, et qui facilite leur analyse. Cette méthodologie, dont le développement est issu d'un co-financement public / privé, implique la collecte d'informations sur les flux entrants et sortants des entreprises, la détection d'opportunités, l'analyse technique, économique et environnementale, par des ingénieurs spécialisés, en partenariat avec les entreprises concernées (van Beers 2008).

Quarante deux projets de synergies régionales de ressources existent aujourd'hui à Kwinana, soit 32 échanges de co-produits et 15 partages d'infrastructure. Il existe entre autres un grand nombre de mutualisations de production et de récupération d'énergie (van Beers et Biswas 2008), des projets de réutilisation d'eau (van Beers, Bossilkov et al. 2006), de nombreux échanges de matériaux inertes et de produits chimiques (van Beers, Corder et al. 2007; van Beers 2008).

1.5 POSITIONNEMENT METHODOLOGIQUE ET QUESTIONS DE RECHERCHE

La définition des symbioses industrielles donnée précédemment fait référence à plusieurs notions concernant l'utilisation d'une ressource comme la substitution de ressources non renouvelables, la réutilisation de certains déchets ou la mutualisation de certains procédés de transformation. Les symbioses industrielles ne sont pas une fin en soi et il existe de nombreuses autres disciplines et méthodologies qui ont pour objectif d'améliorer l'efficacité d'un système industriel. Ainsi, la mise en œuvre de symbioses industrielles ne peut pas aujourd'hui être envisagée sans interactions avec d'autres domaines de l'ingénierie appliquée à l'entreprise et au système industriel. D'ailleurs, la plupart ont les mêmes objectifs que l'écologie industrielle mais ne s'appliquent pas à la même échelle géographique ou organisationnelle.

La Section 1.5.1 décrit cinq méthodologies identifiées comme complémentaires ou poursuivant partiellement les mêmes objectifs que les symbioses industrielles. Il s'agit de la hiérarchie des déchets, de la production plus propre, de l'intégration des procédés, du management environnemental et de l'éco-design. Si ce dernier, défini dans la Section 1.3.1.4, fait partie du champ de l'écologie industrielle, ce n'est pas le cas des quatre premiers dans la majorité des références bibliographiques utilisées dans le cadre de la présente recherche. Il faut toutefois mentionner que ces méthodologies ne s'opposent pas aux quatre stratégies de maturation de l'écologie industrielle et tendent vers le même objectif.

La Section 1.5.2 discute de leur organisation souhaitable dans le temps et de leurs interactions avec le domaine des symbioses industrielles pour aboutir à l'énonciation des trois questions de recherche qui seront développées dans les chapitres suivants.

1.5.1 Autres concepts et procédures pour améliorer l'efficacité d'un système industriel

1.5.1.1 *La hiérarchie des déchets*

Il s'agit une liste d'options pour la gestion et la valorisation des déchets. Elle est établie en fonction de la désirabilité environnementale, ou, en d'autres termes, de l'efficacité de la filière de réutilisation/valorisation considérée (Figure 13) et fait l'objet d'un large consensus au niveau international (Pongrácz et Pohjola 2004). Plus détaillée que la théorie des 3 R (Reduce, Recycle, Reuse), elle est souvent plus difficile à justifier du point de vue de la performance environnementale qui dépend largement du type de déchet considéré. Chacun devrait en effet être étudié en fonction de sa composition, de son mode de collecte et des options de valorisation existantes pour aboutir à un diagnostic clair. Plusieurs auteurs ont abordé cette question ces dernières années, en se basant en général sur les principes de l'analyse du cycle de

vie (Eriksson, Frostell et al. 2002; Kijak et Moy 2004; Assefa, Björklund et al. 2005; Cherubini, Bargigli et al. 2009). Les définitions proposées ci-dessous sont tirées de (Peck 2003) et de la norme ISO 14041.

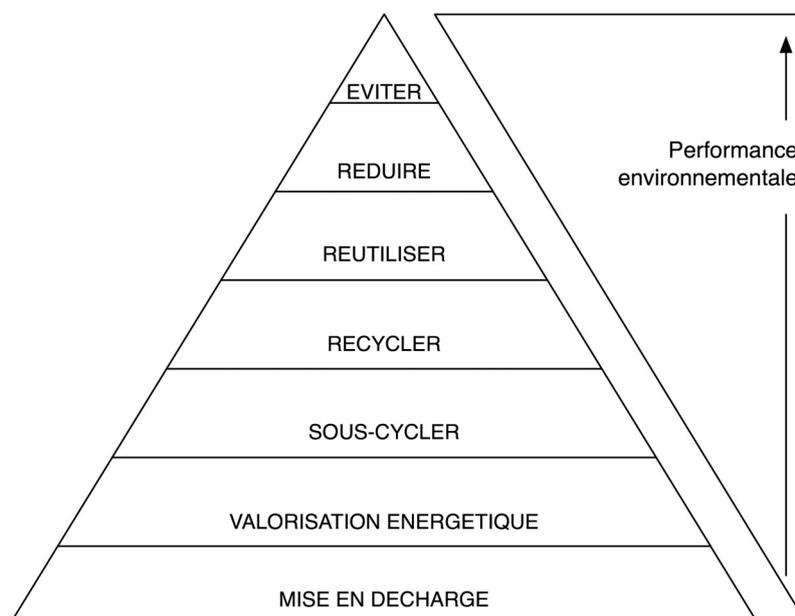


Figure 13 : Hiérarchie des déchets. Source : auteur, à partir de (Kijak et Moy 2004) et (Peck 2003).

1. *Eviter* : Il s'agit de la plus efficace des solutions pour régler la problématique de la gestion des déchets, soit éviter leur production à la source. Du ressort du domaine d'action de l'éco-design, de la production plus propre et du management environnemental, cette solution peut s'avérer très simple et peu coûteuse pour l'entreprise concernée.
2. *Réduire* : Si éviter la production d'un déchet n'est techniquement pas possible, réduire la production de celui-ci s'impose comme deuxième solution. L'introduction du principe du pollueur-payeur, mesure incitative de type économique, a permis d'obtenir des réductions importantes. A l'échelle de l'entreprise, les solutions appliquées concernent par la suppression de l'excès de conditionnement, l'optimisation des paramètres techniques des procédés, la réutilisation des produits intermédiaires et auxiliaires et l'utilisation des meilleures technologies disponibles. A nouveau, réduire la production de déchet est du ressort de champs d'action comme la production plus propre ou l'éco-design.
3. *Réutiliser* : Si les solutions précédentes ne sont pas applicables, la réutilisation, terme désignant une nouvelle utilisation d'un produit pour un usage différent de son emploi initial, peut être recherchée. Elle concerne des produits trop usagés pour être réemployés dans le même procédé et implique soit des traitements intermédiaires, soit leur utilisation dans un autre procédé moins

- contraignant. Les symbioses industrielles sont une stratégie permettant la réutilisation d'un déchet.
4. *Recycler* : Le recyclage consiste en la réintroduction d'un matériau contenu dans un déchet dans le cycle de production, en remplacement total ou partiel d'une matière première. Les propriétés physiques inhérentes au matériau recyclé sont identiques à celles d'un matériau vierge. Le recyclage peut faire appel à des procédés complexes et coûteux comme par exemple la fusion du matériau ou la régénération par distillation.
 5. *Sous-cycler* : Le sous-cyclage – ou *recyclage en boucle ouverte* – désigne un procédé de recyclage au cours duquel les propriétés physiques inhérentes au matériau sont réduites. Il ne s'agit donc pas réellement d'une réutilisation, mais plutôt d'une utilisation dégradée. Dans la littérature spécialisée, de nombreuses symbioses industrielles s'apparentent à du sous-cyclage.
 6. *Valorisation énergétique* : La valorisation désigne la récupération du pouvoir énergétique intrinsèque à un déchet. A ce titre, les unités d'incinération avec récupération de chaleur, de pyrolyse, de méthanisation et de compostage sont considérées comme de la valorisation énergétique. Si l'usage de la valorisation énergétique est très répandu, sa désirabilité environnementale n'en reste pas moins faible comparativement aux filières décrites précédemment.
 7. *Mise en décharge* : La mise en décharge consiste à déposer un déchet dans un lieu prévu à cet effet sans envisager sa valorisation ou sa réutilisation. En termes de désirabilité environnementale, la mise en décharge apparaît comme la filière la moins recommandée. Les décharges sont le symbole d'un usage des ressources linéaire et peu efficace.

Dans cette thèse, l'objectif principal est de favoriser la réutilisation d'un déchet et dans certains cas son sous-cyclage sans empêcher la mise en œuvre de solutions permettant d'éviter ou de réduire la production de déchets.

Dans la hiérarchie des déchets, les différentes solutions de valorisation énergétique sont peu détaillées. Il serait intéressant d'en établir une hiérarchie plus précise pour promouvoir les solutions les plus efficaces. Cette problématique est complexe et sort du cadre de cette recherche.

1.5.1.2 *La production plus propre*

La définition de base de la production plus propre, ou *cleaner production*, en anglais, vient du Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP 1994) (van Berkel, Willems et al. 1997) :

La séquence « ignorer, diluer, contrôler et prévenir » représente le point culminant pour une activité en combinant des effets positifs maximum pour l'environnement accompagnés de gains économiques substantiels pour l'industrie et la société. Atteindre cet objectif est essentiellement le but de la production plus propre – définie comme l'utilisation continue des procédés industriels et

des produits pour prévenir la pollution de l'air, de l'eau et des sols, pour réduire la production de déchets à la source, et pour minimiser les risques pour la population humaine et l'environnement.

16

La production plus propre comprend les techniques suivantes : amélioration de la gestion des ressources, des procédés de production, du design des produits, substitution des matières premières (produits toxiques et matières dangereuses) et réutilisation locale des co-produits. (UNEP 1994) (van Berkel, Willems et al. 1997). Ses objectifs sont d'améliorer l'efficacité des procédés de production et le traitement « end-of-pipe » des déchets. En comparaison des symbioses industrielles, la production plus propre se concentre sur l'optimisation individuelle des procédés de production.

Reconnue depuis le sommet de Rio, en 1992, comme une contribution significative au développement durable, la production plus propre va plus loin que les quatre principes de dispersion, contrôle, recyclage et prévention de la pollution. Cependant, on critique parfois à juste titre des actions menées sous le nom de production plus propre car les premières phases d'un projet se concentrent sur les opportunités présentant un gain économique substantiel, repoussant ainsi la mise en place de solutions, moins avantageuses financièrement, mais plus efficaces du point de vue environnemental. En résumé, la production plus propre est très proche du domaine de l'écologie industrielle et de nombreux recouvrements existent. En général, la production plus propre se concentre sur l'amélioration de l'efficacité des procédés de production à l'échelle de l'entreprise individuelle (van Berkel, Willems et al. 1997).

1.5.1.3 *L'intégration de procédés*

Il s'agit d'un domaine de recherche et d'application proche de la production plus propre. L'intégration de procédés cherche l'optimisation et l'intégration de l'ensemble des procédés d'une chaîne de production en essayant de les intégrer de la manière la plus efficace. Son action va de l'installation d'échangeurs de chaleur à l'optimisation des séquences d'utilisation des différents procédés d'une chaîne.

Une des principales méthodologies utilisées pour optimiser l'usage de l'énergie et de l'eau au niveau d'une chaîne de production ou à l'interne d'une entreprise est l'analyse Pinch. Elle offre des outils pour analyser les courants d'énergie dans un procédé et identifier les manières les plus économiques de récupérer un maximum de chaleur tout en réduisant les consommations de vapeur et d'eau de refroidissement (CTEC-Varenes 2003). La réutilisation d'un flux à l'intérieur même de la chaîne de production correspond à une réutilisation locale et efficace d'un co-produit, plus facile à gérer qu'un

¹⁶ Traduction de l'auteur selon (van Berkel, Willems et al. 1997) :

The sequence of ignore, dilute, control and prevent is one which has culminated in an activity which combines maximum positive effects on the environment with substantial economic savings for industry and society. Achieving this is essentially the goal of cleaner production - defined as the continuous use of industrial processes and products to prevent the pollution of air, water and land, to reduce wastes at source, and to minimize risks to the human population and the environment.

échange entre deux entités économiques distinctes. Comme dans le cas de la production plus propre, l'échelle d'action de l'intégration de procédés est celle de l'entreprise individuelle. Cependant, ses procédures peuvent facilement être adaptées à l'échelle inter-entreprises.

1.5.1.4 Le système de management environnemental

Les systèmes de management environnemental (SME) concernent le management interne d'une entité économique. Il s'agit d'outils qui, en s'intégrant au management global de l'entreprise, permettent de prendre en compte les préoccupations environnementales. Les systèmes de management environnemental permettent d'améliorer la transparence vis-à-vis des autorités environnementales. Ils simplifient ainsi les tâches de contrôle, améliorent la confiance et facilitent une collaboration entre l'Etat et l'entreprise. Deux des principaux systèmes de management environnemental utilisés en Europe sont le EU Eco-Management and Auditing Scheme (EMAS) et le standard ISO 14001 de l'International Organisation for Standardisation (ISO).

Les entités ayant mis en place un tel système ont en règle générale une connaissance approfondie de leurs procédés et des flux de matière et d'énergie qui y sont associés. Ce savoir peut grandement faciliter le travail de collecte des données et d'analyse technique de symbioses industrielles. Les systèmes de management environnemental sont centrés sur l'entreprise et son organisation interne, ils sont aujourd'hui profondément ancrés dans le fonctionnement de certaines entités (Ehrenfeld 2001) et sont très importants pour l'écologie industrielle. Un système de management environnemental est généralement centré sur une entreprise individuelle. Cependant, le développement éco-industriel peut être assimilé à une forme de management environnemental inter-organisationnel (Korhonen, Okkonen et al. 2004).

1.5.2 Objectifs et questions de recherche

Les domaines de recherche et d'application présentés dans les sections précédentes n'agissent pas tous à la même échelle géographique et au même niveau organisationnel. Si la production plus propre, l'intégration de procédés et l'éco-design restent généralement confinés à l'échelle de l'entreprise, les symbioses industrielles concernent les relations inter-entreprises. En d'autres termes, les symbioses industrielles concernent une activité économique et ses relations avec son environnement économique et naturel.

Si le choix nous est donné, il est possible d'établir un ordre de priorité entre ces méthodologies, même si celui-ci ne sera que rarement respecté dans la réalité. Premièrement, il conviendrait de concevoir des produits aux impacts environnementaux réduits. L'éco-design peut y contribuer lors de la phase de conception. Ces produits vont malgré tout demander l'usage de certaines ressources naturelles et engendrer la production de co-produits, sous-produits et produits résiduels indésirables. Deuxièmement, il est nécessaire de bien connaître et maîtriser chaque procédé de production afin de les optimiser

individuellement et au sein de la chaîne de production. Troisièmement, lorsqu'il n'existe plus aucune possibilité d'optimisation à l'interne de l'entreprise, les symbioses industrielles peuvent favoriser un usage optimum des co-produits et sous-produits encore générés (Figure 14).

Ainsi, il est possible d'établir des priorités d'action pour l'optimisation du système industriel. Celles-ci concernent essentiellement les activités du secteur de la production:

1. Mise en place d'un système de management environnemental pour augmenter les connaissances au sein de l'entreprise ;
2. Intégration des principes d'éco-design dans le développement des produits ;
3. Effectuer une analyse de l'intégration des procédés pour une optimisation interne des chaînes de production dans l'entreprise ;
4. S'impliquer dans une démarche collective avec les entreprises voisines pour rechercher des opportunités de symbioses industrielles.

Cette classification correspond cependant à une situation idéale, peu réaliste dans la pratique, plusieurs stratégies étant en général appliquées simultanément. De plus, les choix effectués dans le cadre d'une certaine stratégie peuvent empêcher la mise en place d'une autre solution, qui se serait avérée plus rentable ou réduisant les impacts environnementaux de manière plus efficace. Ce dernier point est crucial en ce qui concerne les symbioses industrielles. Etant donné qu'elles ne s'intéressent pas précisément à l'optimisation de chaque procédé individuel, un échange de co-produits à l'échelle inter-entreprises peut dans certains cas prolonger l'utilisation de procédés obsolètes. Une pesée des intérêts doit toujours être effectuée. Un référentiel d'analyse des symbioses industrielles, développé dans les chapitres 2 et 4 permet d'approcher cette problématique.

Ainsi, cette thèse se concentre sur l'échelle extra-entreprise mais tient également compte des autres procédures d'amélioration des activités économiques. Elle essaie également d'être en phase avec les besoins des acteurs économiques et des pouvoirs publics d'un territoire. En intégrant de nombreuses considérations de terrain, elle a pour objectif d'apporter des éléments de réponse aux collectivités publiques, principalement dans le contexte suisse, qui souhaitent travailler à l'amélioration de l'organisation des activités économiques.

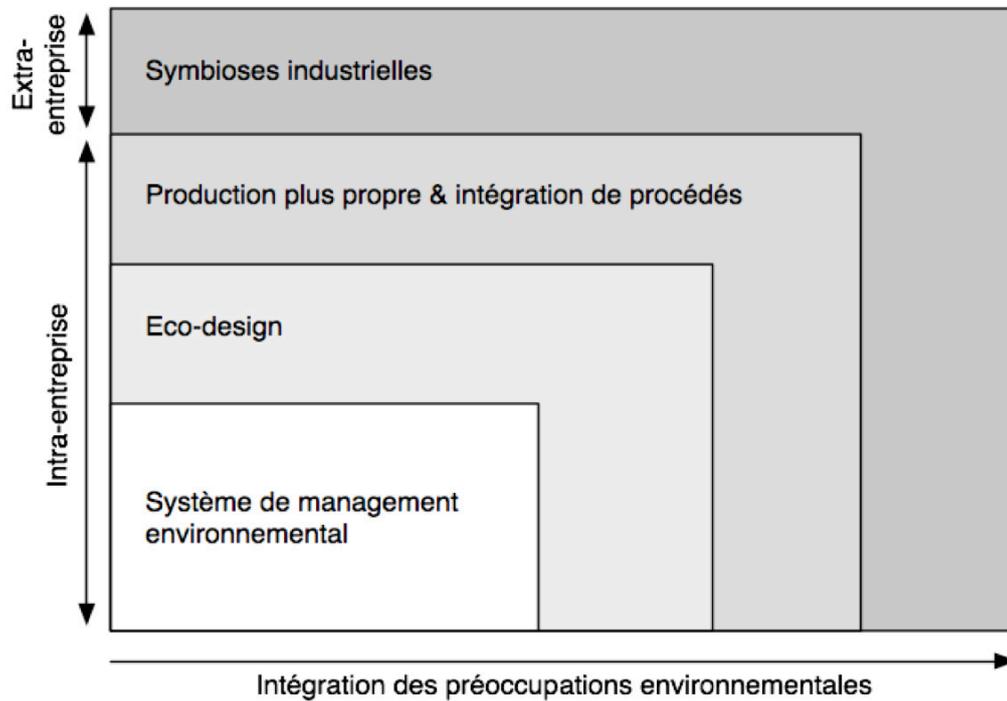


Figure 14 : Interactions entre les différentes méthodologies d'optimisation d'un système industriel.

Source : auteur.

Sur la base de tous les éléments présentés dans les sections précédentes, les chapitres suivants ont comme objectif de répondre à trois questions de recherche en s'appuyant sur les études de cas présentées dans la Section 1.6.

La première question concerne le choix entre les différentes solutions offertes par les procédures présentées précédemment et les différentes solutions de valorisation des déchets. Leur potentiel pour réduire les impacts environnementaux d'un système diffère en fonction de la ressource et du système considérés. Afin d'éviter les fausses bonnes idées et la mise en œuvre de solutions qui ne représentent pas un optimum environnemental et économique, il nous est apparu pertinent d'apporter des éléments de réponse à la question suivante :

Dans quels cas les symbioses industrielles offrent-elle des solutions pertinentes par rapport aux filières de transformation, de collecte et de valorisation existantes des déchets ? Il existe aujourd'hui des filières de recyclage très efficaces. Pour quels flux de matière et d'énergie les symbioses industrielles représentent-elles une réduction des impacts environnementaux et une valeur ajoutée économique et sociale ?

Il ne suffit cependant pas de savoir quelle est la solution la plus efficace. Chaque entreprise a une manière différente d'utiliser les flux de matière et d'énergie : favoriser l'essor de symbioses industrielles sur un territoire requiert des procédures adaptées et flexibles. Ainsi, la deuxième question discutée dans cette thèse peut être formulée de la manière suivante :

Comment détecter, analyser et mettre en œuvre des symbioses industrielles techniquement, légalement, économiquement et environnementalement réalisables afin de favoriser la création d'un écosystème industriel sur un territoire ?

Cependant, influencer et modifier sur le terrain les habitudes des acteurs économiques afin de réduire les impacts environnementaux de leurs activités n'est pas une tâche aisée. En Suisse, les collectivités publiques jouent un rôle important dans la protection de l'environnement et elles sont actives dans de nombreux domaines comme l'aménagement du territoire, son équipement ou la gestion des déchets. Afin de ne pas développer de nouveaux projets inutiles ou de doublons, une troisième question se pose :

Les symbioses industrielles sont-elles une stratégie efficace pour accélérer la transition du système industriel et favoriser un usage efficace et local des ressources et peuvent-elles contribuer aux stratégies existantes et s'intégrer dans les actions liées à l'organisation du territoire ?

1.5.3 Structure du document

Ce premier chapitre, dans lequel ont été présentés une introduction et une revue de la littérature générale de l'écologie et des symbioses industrielles, a permis de poser trois questions de recherche. La section suivante termine ce chapitre introductif en présentant une introduction sur le contexte économique, industriel et légal de la Suisse et des deux projets pilotes, de Genève et de Lausanne Région, qui sont utilisés comme études de cas dans le cadre de cette recherche (Section 1.6)

Les trois chapitres suivants ont pour objectif d'apporter des éléments de réponse aux trois questions en se basant sur les études de cas en Suisse romande. Ainsi, le Chapitre 2 détaille deux procédures de terrain dont l'objectif est de favoriser la mise en œuvre d'un contexte de collaboration et de confiance entre les acteurs économiques et l'administration publique d'un territoire. Leur but est de favoriser le transfert et l'échange d'informations concernant la consommation de ressources et la production de co-produits des activités économiques afin d'inciter ses acteurs à mettre en œuvre des symbioses industrielles. Premièrement, une revue de littérature spécifique à la création d'un contexte de collaboration est proposée, apportant une attention particulière au processus de sensibilisation des acteurs et à leur implication dans un projet (Section 2.2). Elle fait le point des avancées dans ce domaine de manière générale et dans le contexte particulier de l'écologie industrielle. Deux procédures d'action sur le terrain

sont ensuite proposées, la première suggère une méthodologie pour l'audit des flux de matière et d'énergie des entreprises, suivi d'une détection exhaustive et exploratoire de symbioses (Section 2.5.1). La deuxième, basée sur les connaissances d'un expert coordinateur de projet, se concentre sur la reproduction de bonnes pratiques déjà existantes sur le territoire considéré ou dans d'autres régions du monde (Section 2.5.2). Elle se caractérise par une approche dite déductive et rapide. Finalement, leur utilisation dans le cadre des études de cas de Genève et Lausanne est détaillée et une analyse critique de leur potentiel pour favoriser la mise en œuvre de synergies industrielles dans le contexte Suisse romand et international est présentée (Section 2.6 et 2.7).

Les procédures de mise en œuvre développées requièrent toutes les deux de grandes quantités d'informations liées aux flux de matière et d'énergie et à l'organisation du territoire considéré. Ces données, de sources et de types multiples, doivent pouvoir être stockées, manipulées, traitées et communiquées facilement pour accompagner et soutenir de manière optimale les acteurs d'un projet dans leur prise de décision. Le Chapitre 3 détaille donc la création d'une base de données destinée à accueillir des informations sur les flux des entreprises et les ressources d'un territoire. Son objectif est double : servir d'outil d'aide à l'analyse et à la décision et faciliter les actions de sensibilisation et de communication. Pour cela, elle offre la possibilité de stocker des bilans de flux issus d'audits de terrain (données systématiques) ou de la littérature (données déductives) par entreprise ou par secteur d'activité. Elle permet également de chercher des correspondances de substitution et de mutualisation et de les classer selon leur pertinence. L'analyse de faisabilité est d'ailleurs un élément central quelle que soit la procédure utilisée. Une interface de gestion de la base de données s'appuyant sur les systèmes d'information géographiques est développée afin de faciliter l'analyse spatiale des pistes de synergies détectées. Plusieurs fonctionnalités intégrant les données spatiales du territoire sont développées pour élargir les perspectives d'analyse. Basé sur une interface web facilement accessible pour de nombreux utilisateurs, le logiciel, appelé SymbioGIS, comprend plusieurs fonctionnalités testées dans le cadre de l'étude de cas de Genève (Section 3.3). L'application concrète permet d'analyser comment les connaissances sur les flux de matière peuvent être intégrées dans les problématiques d'aménagement du territoire et ouvre des perspectives sur les possibilités de rapprocher promotion économique, protection de l'environnement et planification territoriale. En fin de chapitre, une analyse critique des développements effectués est proposée en lien avec les perspectives de recherche en Suisse et à l'échelle internationale (Section 3.5).

Le Chapitre 4 se penche plus en détail sur les symbioses industrielles existantes sur les territoires du canton de Genève et de Lausanne Région (Sections 4.2 et 4.3). Il propose une analyse technique, légale, économique et environnementale des potentiels de symbioses industrielles pour 18 familles de flux (Section 4.4). Son objectif est de déterminer quelles sont les symbioses industrielles techniquement réalisables et pertinentes dans le contexte suisse et dans quels cas celles-ci représenteraient une réelle plus-value par rapport à la situation actuelle. Finalement, une représentation de l'écosystème industriel existant sur ces deux territoires est proposée (Section 4.5).

Au cours de cette recherche, la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles est abordée sous plusieurs angles : la gestion de projet, la création d'un outil d'aide à la décision et l'analyse de faisabilité dans le contexte suisse. Ces trois approches sont reprises dans la discussion générale du Chapitre 5. Une synthèse des travaux est proposée afin d'identifier les forces et les faiblesses des travaux menés en Suisse romande et d'évaluer les possibilités de transposition dans le contexte asiatique.

1.6 PRESENTATION DES ETUDES DE CAS EN SUISSE ROMANDE

Les recherches présentées dans les chapitres suivants s'appuient sur les travaux réalisés dans le cadre de deux projets pilotes en Suisse romande qui sont considérés comme les principales études de cas pour tester des propositions théoriques. Le premier projet s'est déroulé dans le canton de Genève entre 2004 et 2010. Il a été initié et coordonné par le groupe de travail interdépartemental Ecosite, sous l'égide de l'Agenda 21 cantonal. Le travail de terrain en lien avec cette recherche a été réalisé par l'intermédiaire de l'Institut pour la Communication et l'Analyse des Sciences et des Technologies (ICAST), puis par le bureau de conseil en environnement SOFIES, en partenariat avec le groupe d'écologie industrielle de l'Université de Lausanne (Section 1.6.3). Le deuxième projet pilote s'est déroulée sur le territoire de Lausanne Région en 2007 et 2008 et a été réalisée par le groupe d'écologie industrielle de l'Université de Lausanne, sur mandat des Services industriels de Lausanne (SIL) (Section 1.6.4).

Ces deux projets sont les premiers de ce type réalisés en Suisse romande à notre connaissance et servent donc d'expériences pilotes pour évaluer le potentiel des symbioses industrielles en Suisse et la répliquabilité des démarches réalisées sur le terrain.

Afin de décrire le contexte national et régional dans lesquels se sont déroulés les travaux de terrain, la première partie de cette section présente brièvement le système industriel de la Suisse et les éléments qui le composent (Section 1.6.1). Ensuite, sont présentées les grandes tendances liées à la consommation de ressources naturelles et de gestion des déchets en Suisse (Section 1.6.2).

1.6.1 Le contexte économique et industriel suisse

Les activités économiques sur un territoire se divisent en trois grandes catégories. Le *secteur primaire* qui regroupe l'ensemble des activités liées à l'extraction de ressources de la croûte terrestre, à l'agriculture, à la pêche et à la sylviculture. Le *secteur secondaire* concerne l'ensemble des activités liées à la transformation des matières premières issues du secteur primaire dans le but de produire des biens de consommation. Il comprend des activités aussi variées que la production d'énergie et d'eau, la construction et l'industrie manufacturière. Cette dernière englobe, par exemple, la fabrication de machines et d'équipement dans les domaines de l'électronique, de l'horlogerie, de l'automobile, de l'industrie chimique ou de l'édition de revue et de livres. Le *secteur tertiaire* comprend l'ensemble des services. Il s'agit des activités économiques proposant des prestations d'assistance aux individus ou aux entreprises, comme l'assurance, l'enseignement, la grande distribution, les associations, le tourisme, ainsi que les transports qui sont généralement considérés comme faisant partie du secteur tertiaire. Si cette répartition semble triviale, il importe de distinguer le secteur d'activité global d'une entité économique et la répartition

des activités à l'intérieur de celle-ci. Une entreprise du secteur secondaire doit, par la force des choses, posséder des services administratifs, qui s'apparentent alors à des activités du secteur tertiaire.

Pour décrire l'entier du système industriel, un élément doit être ajouté à cette nomenclature, il s'agit des activités s'occupant de traiter les biens et produits en fin de vie : les *entités de collecte, tri et valorisation des déchets* ou *recycleurs*. Ceux-ci sont considérés comme des processeurs de matériaux et leur activité se situe à l'interface entre les secteurs primaires et secondaires (Figure 15).

L'extraction d'une ressource, la production d'un produit fini ou d'un service implique obligatoirement le recours à un ou plusieurs procédés impliquant la transformation et/ou la consommation de ressources naturelles. Dans les secteurs primaire, secondaire et tertiaire, chaque entité économique peut être décomposée en une succession de procédés. Le niveau du procédé peut ainsi être considéré comme le niveau inférieur à celui de l'entité économique. Il existe plusieurs nomenclatures des procédés de transformation dans le monde, qui rendent très difficile le recours à une classification homogène et actualisée (Nigam 2007).

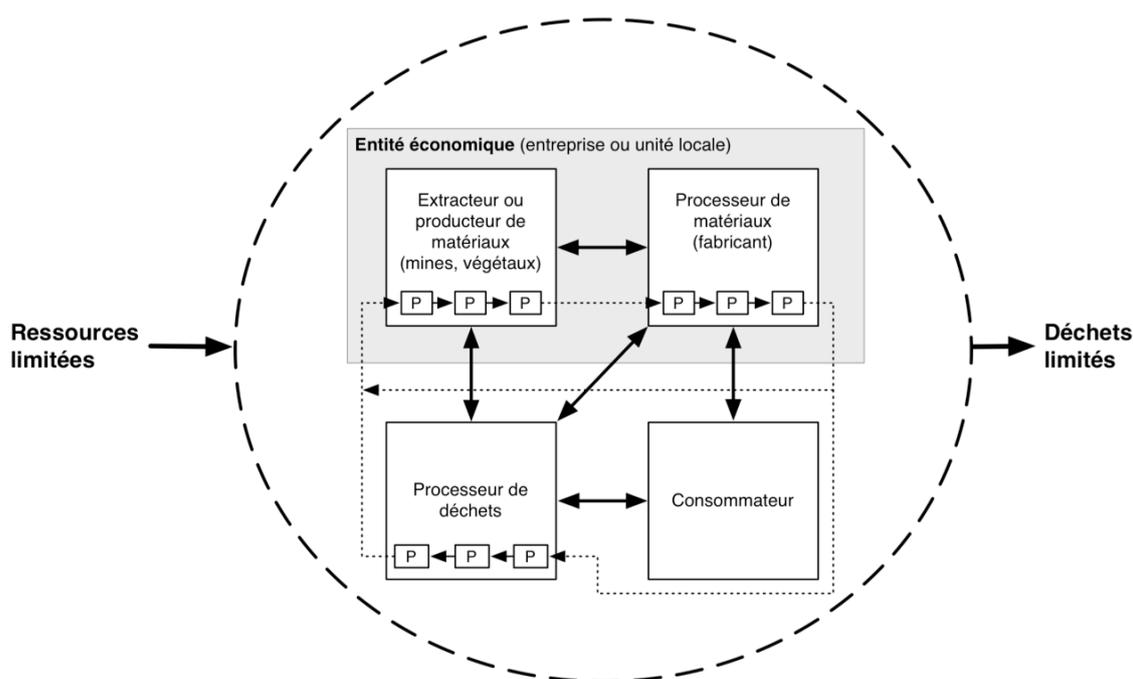


Figure 15 : Evolution d'un écosystème industriel à travers les interactions entre les éléments qui le composent. Source : (Erkman 1998), modifié par l'auteur.

1.6.1.1 Définition de l'entité économique et de l'entreprise en Suisse

Dans la législation suisse, une entreprise est comme une « entité comptable », qu'elle soit active dans les secteurs primaire, secondaire ou tertiaire. Quelle que soit sa forme, elle peut être considérée comme un

sous-système d'un système plus important, le système économique global. L'importance des liens entre les entreprises au sein du système économique actuel fait qu'il est souvent difficile d'en distinguer les frontières. Dans les grandes entités, il est parfois très difficile d'identifier les différences entre une unité de production ou de gestion à l'intérieur de la firme et une entreprise indépendante (Allenby 1999). L'*entité économique* est le terme général utilisé en Suisse pour décrire les activités économiques présentes sur un territoire (les activités économiques représentent alors les différents secteurs d'activité). La Confédération définit différents types d'entités économiques essentiellement pour des raisons de clarté dans les statistiques fédérales (OFS 2008). Les définitions utilisées pour le Recensement des entreprises et le Registre des entreprises et des établissements, qui contient l'ensemble des entités économiques présentes sur le territoire, sont concordants avec les définitions édictées par l'Office européen de la statistique (Eurostat). Elles ont cependant été adaptées au système économique et administratif suisse. Les trois unités statistiques, ou entités économiques, ayant un intérêt direct ici sont le *groupe d'entreprises*, l'*entreprise* et l'*unité locale*.

L'*entreprise* correspond à la plus petite combinaison d'unités légales qui constitue une unité organisationnelle de production de biens et de services jouissant d'une certaine autonomie de décision, notamment pour l'affectation de ses ressources courantes. Une entreprise peut exercer une ou plusieurs activités dans un ou plusieurs lieux, comprendre une seule ou être la réunion de plusieurs unités légales (personnes physiques ou morales) selon la nature de ses activités ou pour des raisons administratives.

Le *groupe d'entreprises* rassemble au moins deux entreprises tenues par des liens juridico-financiers. Il peut comporter une pluralité de centres de décision, notamment en ce qui concerne la politique de production, de vente et la répartition des bénéfices, il peut également unifier certains aspects de la gestion financière et de la fiscalité, il constitue une entité économique qui peut effectuer des choix qui concernent les unités alliées qui le composent.

La plus petite des entités, l'*unité locale* correspond à une entreprise ou une partie d'entreprise (atelier, usine, magasin, bureau, mine, entrepôt) sise en un lieu géographique unique et à partir duquel sont exercées des activités économiques dans lesquelles, sauf exception, une ou plusieurs personnes travaillent pour le compte d'une même entreprise (CEE 1993; OFS 2008).

L'organisation des différentes entités est représentée à la Figure 16. Elles peuvent être en mains privées ou publiques. En Suisse, l'Etat est souvent, directement ou indirectement dans le cas des organismes parapublics, l'employeur le plus important en terme de pourcentage des emplois d'un territoire et son influence sur l'ensemble des activités économiques est considérable. Le rôle et l'influence respective des entités publiques et privées dans les décisions liées à l'avenir du système industriel sont complexes et nous y reviendrons dans la Section 2.6.4. Dans le système économique actuel, les choix stratégiques des entités économiques sont généralement influencés par cinq éléments extérieurs : le pouvoir de négociation des clients, le pouvoir de négociation des fournisseurs, l'apparition de nouveaux produits, l'intensité de la concurrence intra-sectorielle et la menace d'entrants potentiels (Porter 1986). La combinaison de ces éléments permet de déterminer la position d'une entité économique sur un marché.

Un sixième facteur est en général ajouté dans le cadre d'analyses de marché : il s'agit des pouvoirs publics qui peuvent influencer chacun des cinq éléments précédents par la mise en œuvre de lois et de mécanismes de régulation, dans le domaine environnemental par exemple (Figure 17). Cependant, on peut relever que le schéma n'apporte rien sur ce qui se passe en aval. Michael Porter (Porter 1986) ne considère pas le recyclage et la fin de vie des produits. Il n'intègre pas non plus d'autres types d'interaction entre les entreprises, à l'image des symbioses industrielles.

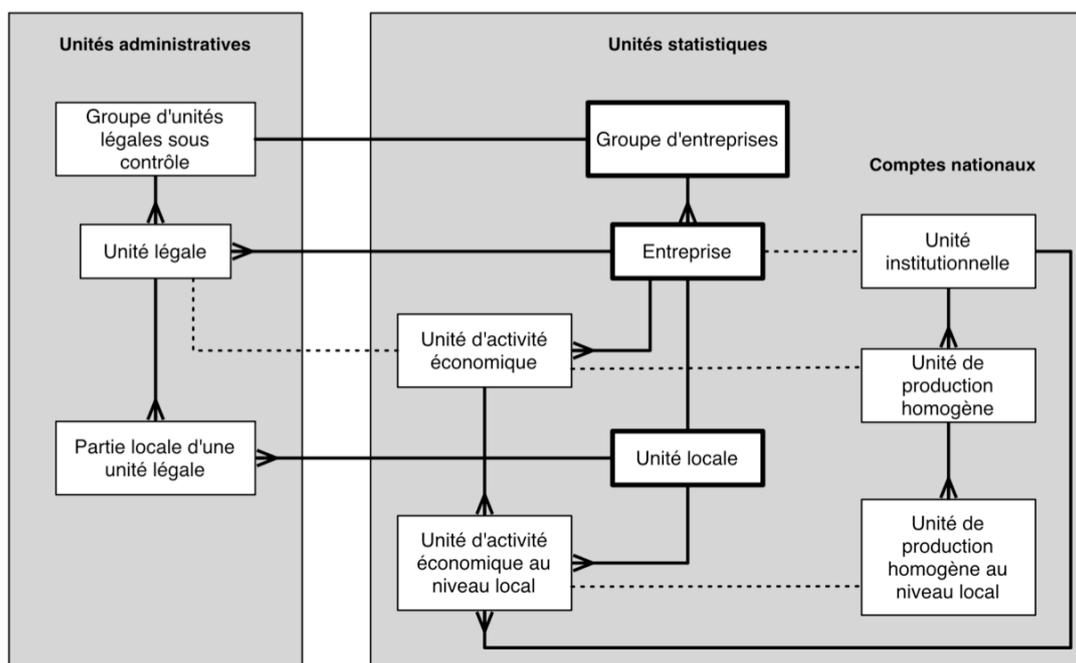


Figure 16 : Système d'unités administratives et statistiques suisse pour la description des activités économiques. Source : (OFS 2008)

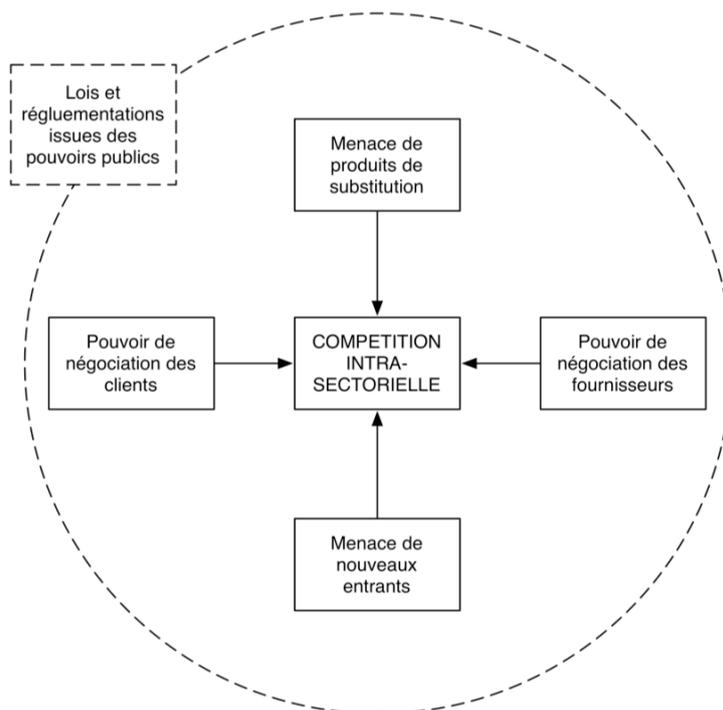


Figure 17 : Les cinq forces influençant les entités économiques et définissant leur position sur un marché.

Source : (Porter 1986).

1.6.1.2 La Nomenclature générale des activités économiques

Toute activité économique ou entité économique présente sur le territoire suisse est classifiée selon la nomenclature générale des activités économiques (NOGA) produite par l'Office Fédérale de la Statistique (OFS). C'est un outil de travail destiné à structurer et à analyser l'organisation des activités économiques et qui se compose de cinq niveaux, par ordre de précision croissant : sections (21), divisions (88), groupes (272), classes (615) et genres (794). Le Tableau 1 liste les 21 sections de la classification NOGA dans sa mouture de 2008. Pour faciliter l'échange d'informations avec nos voisins européens et le reste du monde, des tables de correspondance ont été créées pour les principaux systèmes internationaux. La NOGA est entre autre compatible avec la classification des activités économiques de la Communauté Européenne (NACE), jusqu'au niveau de la classe (OFS 2008).

Les activités du secteur primaire sont décrites par la section A. Le secteur secondaire regroupe les sections B à H et partiellement les sections J (information et communication) et M (activités spécialisées, scientifiques et techniques). Les autres classes (I à U) sont attribuées au secteur tertiaire (Tableau 1).

Cette classification sera utilisée par la suite pour décrire l'activité de chaque entreprise ayant pris part à une des deux études de cas détaillées dans ce travail. Pour des raisons de lisibilité et de clarté, elles sont définies par leur section et leur division selon la nomenclature NOGA (Section 4.2 et 4.3).

1.6.1.3 Terminologie des activités économiques du domaine de la gestion des déchets

La section E de la NOGA regroupe les activités économiques liées à la production et à la distribution d'eau, à l'assainissement, à la gestion des déchets et à la dépollution (Tableau 1). La division E 38 comprend les activités de collecte et de traitement et d'élimination des déchets, ainsi que leur transport local et l'exploitation d'installations de récupération. La NOGA différencie trois types d'activités (OFS 2008) :

- La *collecte* (groupe E 381) comprend l'enlèvement de déchets des ménages et des entreprises au moyen de poubelles, de bacs à roulettes ou de conteneurs ;
- Le *traitement* et l'*élimination* (groupe E 382) comprend l'élimination et le traitement avant élimination de plusieurs formes de déchets. Les méthodes considérées sont le traitement des déchets organiques dans le but de les éliminer, le traitement et l'élimination d'animaux toxiques vivants ou morts et d'autres déchets contaminés, le traitement et l'élimination des déchets radioactifs transitoires des hôpitaux, etc., le déchargement, l'immersion et l'enfouissement des déchets, l'élimination de biens usés tels que les réfrigérateurs pour éliminer des déchets dangereux et l'élimination des déchets par incinération ou par combustion. La récupération d'énergie produite lors du processus d'incinération des déchets est également comprise.
- La *récupération* (groupe E 383) comprend le démantèlement d'épaves et la récupération de déchets triés (comme la transformation de déchets et de débris métalliques et non métalliques en matières premières secondaires en mettant généralement en œuvre des processus de transformation mécanique ou chimique, ainsi que la récupération de matériaux se trouvant dans les flux de déchets, en séparant et en triant les matériaux récupérables dans les flux de déchets non dangereux (les ordures) ou en séparant et en triant les matériaux de récupération non triés, tels que papier, plastique, boîtes à boisson et métaux usagés).

Le troisième groupe mentionne explicitement la transformation de déchets en matières premières secondaires. Le lien avec les symbioses industrielles peut s'expliquer de la manière suivante : les acteurs de la fin de vie des déchets, les entreprises de collecte, de traitement et de récupération (sauf dans le cas de l'élimination) sont nommés *repreneurs*, mais ce sont souvent des *intermédiaires* permettant la mise sur le marché de matières premières secondaires, après, dans certains cas, un ou plusieurs procédés de traitement. Un intermédiaire peut donc être un collecteur ou un recycleur. A titre d'exemple, l'entreprise Cridec dans le canton de Vaud mélange différents déchets dans le but de créer un combustible de substitution pour le cimentier Holcim. Pour faire le lien avec la hiérarchie des déchets décrite dans la Section 1.5.1.1, un intermédiaire regroupe la réutilisation, le recyclage, le sous-cyclage et la valorisation énergétique.

Tableau 1 : 21 sections de la Nomenclature générale des activités économiques (NOGA) Suisse. Source : (OFS 2008).

Sections	Titres 2008
A	AGRICULTURE, SYLVICULTURE ET PÊCHE
B	INDUSTRIES EXTRACTIVES
C	INDUSTRIE MANUFACTURIÈRE
D	PRODUCTION ET DISTRIBUTION D'ÉLECTRICITÉ, DE GAZ, DE VAPEUR ET D'AIR CONDITIONNÉ
E	PRODUCTION ET DISTRIBUTION D'EAU; ASSAINISSEMENT, GESTION DES DÉCHETS ET DEPOLLUTION
F	CONSTRUCTION
G	COMMERCE; RÉPARATION D'AUTOMOBILES ET DE MOTOCYCLES
H	TRANSPORTS ET ENTREPOSAGE
I	HÉBERGEMENT ET RESTAURATION
J	INFORMATION ET COMMUNICATION
K	ACTIVITÉS FINANCIÈRES ET D'ASSURANCE
L	ACTIVITÉS IMMOBILIÈRES
M	ACTIVITÉS SPÉCIALISÉES, SCIENTIFIQUES ET TECHNIQUES
N	ACTIVITÉS DE SERVICES ADMINISTRATIFS ET DE SOUTIEN
O	ADMINISTRATION PUBLIQUE
P	ENSEIGNEMENT
Q	SANTÉ HUMAINE ET ACTION SOCIALE
R	ARTS, SPECTACLES ET ACTIVITÉS RÉCRÉATIVES
S	AUTRES ACTIVITÉS DE SERVICES
T	ACTIVITÉS DES MÉNAGES EN TANT QU'EMPLOYEURS; ACTIVITÉS INDIFFÉRENCIÉES DES MÉNAGES EN TANT QUE PRODUCTEURS DE BIENS ET SERVICES POUR USAGE PROPRE
U	ACTIVITÉS EXTRA-TERRITORIALES

Le troisième groupe mentionne explicitement la transformation de déchets en matières premières secondaires. Le lien avec les symbioses industrielles peut s'expliquer de la manière suivante. Les acteurs de la fin de vie des déchets, les entreprises de collecte, de traitement et de récupération (sauf dans le cas de l'élimination) sont nommés *repreneurs*, mais ce sont souvent des *intermédiaires* permettant la mise sur le marché de matières premières secondaires, après, dans certains cas, un ou plusieurs procédés de traitement. Un intermédiaire peut donc être un collecteur ou un recycleur. A titre d'exemple, l'entreprise Cridec dans le canton de Vaud mélange différents déchets dans le but de créer un combustible de substitution pour le cimentier Holcim. Pour faire le lien avec la hiérarchie des déchets décrite dans la Section 1.5.1.1, un intermédiaire regroupe la réutilisation, le recyclage, le sous-cyclage et la valorisation énergétique.

Le rôle d'intermédiaire ne doit pas être confondu avec celui de *tiers opérateur*, un autre terme fréquemment utilisé dans le domaine des symbioses industrielles et en particulier pour les synergies de

mutualisation et de partage d'infrastructure. Un tiers opérateur est une entité économique qui intervient dans la mise en œuvre, la gestion et les opérations des activités économiques. Elle participe aux activités de l'entreprise sans toutefois faire partie de sa structure juridique. A titre d'exemple, une infrastructure de production de chaleur partagée par plusieurs entreprises est souvent gérée par un tiers opérateur technique comme les Services Industriels de Genève.

Le Tableau 2 résume la terminologie utilisée dans cette recherche.

Tableau 2 : Terminologie utilisée pour la description des filières de valorisation des déchets. Source : auteur.

TERMINOLOGIE	DESCRIPTION
Repreneur ou intermédiaire	Entité économique s'occupant d'une des étapes menant le déchet vers son élimination ou sa valorisation (en vue de sa réintroduction dans le marché), le collecteur, l'entreprise de valorisation et le recycleur sont des intermédiaires.
Collecteur	Entité économique qui collecte, trie et stocke temporairement le déchet.
Entreprise de valorisation	Entité économique qui utilise (réemploi, réutilisation, sous-cyclage) la matière qui constituait le déchet pour en faire un nouveau produit (par exemple verre comme substitut à la grave, sciure de bois pour la production d'agglomérés, PS comme matériau isolant).
Recycleur	Entité économique qui transforme (procédé industriel) la matière qui constitue le déchet en vue de la réintroduire sur le marché (fonderie de PET, de verre, de métal, papeterie).
Tiers opérateur	Entité économique qui intervient dans la mise en œuvre, la gestion et les opérations des activités économiques. Elle participe aux activités, par exemple la gestion des déchets ou la production de chaleur, d'autres entreprises sans toutefois faire partie de sa structure juridique.

1.6.2 Consommation de ressources et production de déchets en Suisse

1.6.2.1 *La comptabilité physique fédérale*

La Suisse est l'un des pays en train d'approfondir ses connaissances sur les besoins matériels de ses activités économiques, de leur consommation de ressources naturelles et du cheminement de ces

dernières. L'OFS mène depuis plusieurs années des travaux de suivi de la consommation des ressources naturelles en se basant sur la méthodologie développée par Eurostat et détaillée dans la Section 1.3.1.2.

La Figure 18 décrit le modèle appliqué à la Suisse et renseigne sur les tonnes par habitant consommées en Suisse pour les années 1990 et 2006.

Chaque année, l'ensemble des besoins matériels (TMR), s'élève à plus de 300 millions de tonnes, soit plus de 40 tonnes par habitant et par an en 2006. Le TMR est la somme de tous les flux directs entrants (extraction indigène et importations), les flux indirects à savoir l'extraction indigène non-utilisée et les flux cachés liés aux importations. Ce chiffre renseigne sur la quantité de matières extraites dans la nature et nécessaires aux activités économiques du pays. En comparaison, le TMR des Etats-Unis pour l'année 2000 est de 63 tonnes par habitant et par an et celui des 15 pays composant l'Union européenne en 1997 de 47 tonnes par habitant et par an. Le chiffre plus faible obtenu par la Suisse peut être expliqué de deux manières. Premièrement, la Suisse importe beaucoup de pétrole par rapport à ses voisins européens dont l'économie est plus dépendante du charbon et le pétrole génère de plus faibles quantités de matière non-utilisée. Deuxièmement, la Suisse possède peu d'industrie lourde (Mayerat Demarne et Kolher 2007).

Cette dernière indication est importante pour évaluer le potentiel de développement des symbioses industrielles sur un territoire car la plupart des projets internationaux dans ce domaine se concentrent en effet sur des régions fortement industrialisées.

Les matériaux de construction sont une catégorie de ressources représentative du contexte économique Suisse. En 2006, le pays a consommé plus de 50 millions de tonnes de sable et de gravier utilisés pour construire les bâtiments, les routes, les ouvrages d'art et autres infrastructures. Si 33,4 millions ont été extraites des carrières suisses, 7,3 millions de tonnes ont été importées, auxquelles il faut ajouter 5,3 millions de tonnes extraites en Suisse mais non utilisées et 4,5 millions de tonnes de flux cachés dans les importations. Au cours de la même années, plus d'un million de tonnes de sable et de gravier ont été mis en décharge en Suisse (Schmid 2008). Les flux de sable et de gravier sont représentés à la Figure 19. Le même type de statistique peut être obtenu pour d'autres types de matières.

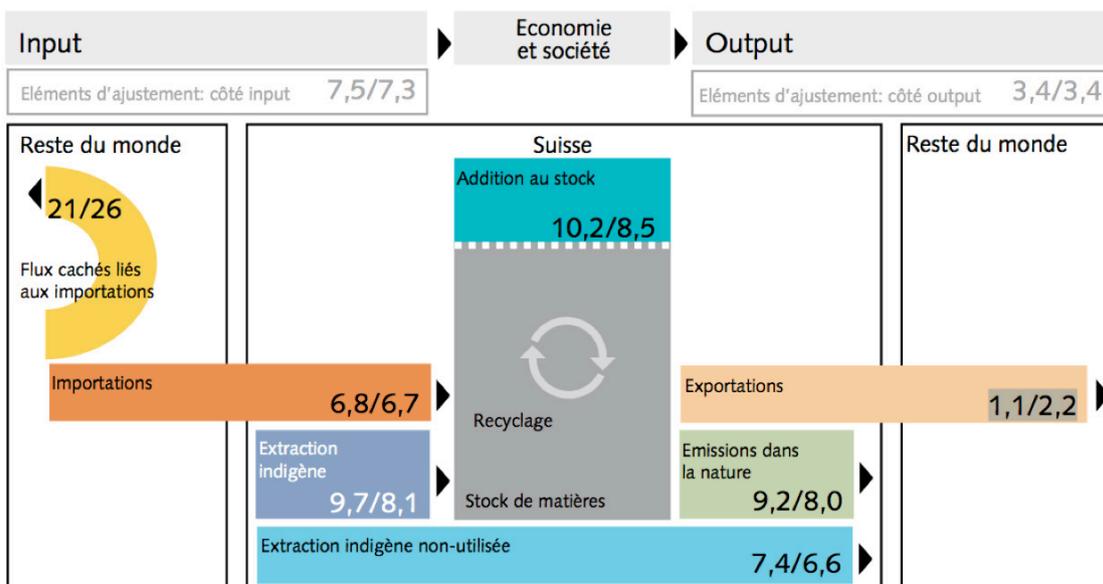


Figure 18 : Modèle de comptabilité physique proposé par Eurostat appliqué à la Suisse pour 1990/2006. Les chiffres sont en tonnes par habitant et par année. Source : (Schmid 2008).

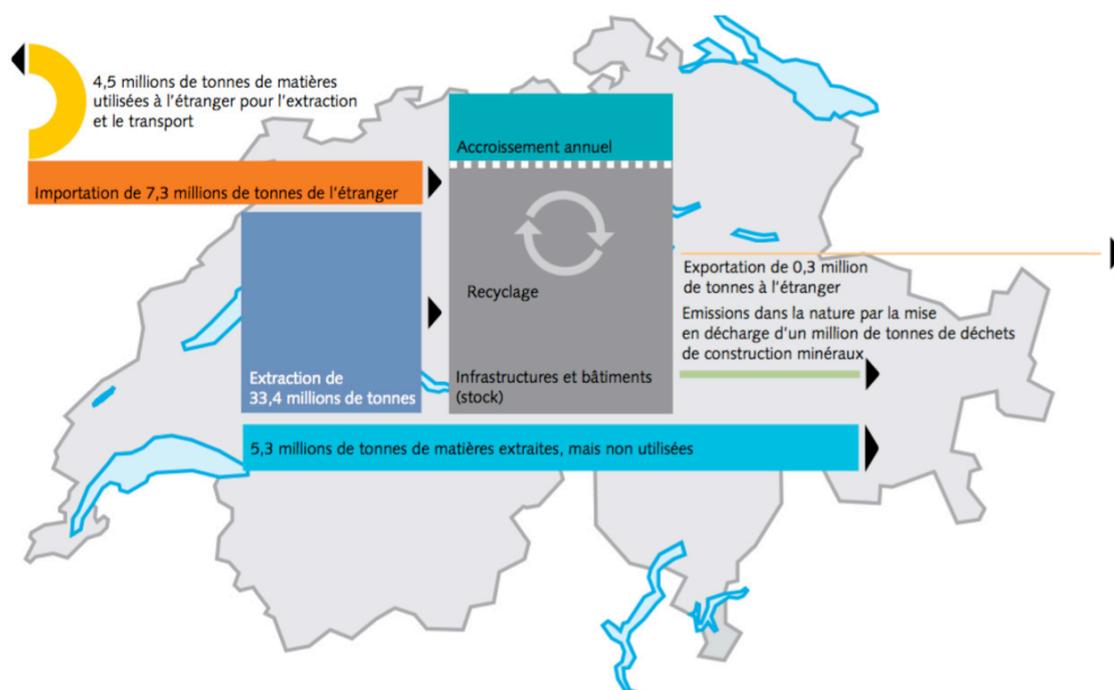


Figure 19 : Flux de sable et de gravier en 2006. Source : (Schmid 2008).

1.6.2.2 *Statistique de la production de déchets*

Selon les chiffres de la statistique fédérale des déchets pour l'année 2007, la production de déchets collectés s'élève à près de 19 millions de tonnes, dont la plus grande partie est constituée de déchets de chantier (12 millions de tonnes). Le volume des déchets spéciaux représentait un peu moins de 1,2 millions de tonnes en 2005 et celui des déchets urbains produits par les ménages et les entreprises en 2007 s'élevait à 5,46 millions de tonnes, dont 51 % ont été transformés en matériaux (réutilisation, recyclage, sous-cyclage) et 49 % acheminés dans les 29 UIOM de Suisse pour y être valorisés énergétiquement. Ces statistiques sont présentées dans le rapport de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) sur la gestion des déchets 2008, qui dresse un bilan de la gestion des déchets en Suisse (Hügi, Gerber et al. 2008).

La Suisse, en comparaison internationale, figure en tête de liste pour les taux de recyclage (Costa, Massard et al. 2010). Celui-ci est très élevé pour certains matériaux comme le verre qui atteint 95 %.

Le taux d'incinération des déchets urbains est particulièrement important. La Suisse a fait le choix de l'incinération depuis plusieurs décennies. En 2007, la Suisse et la Principauté du Liechtenstein ont totalisé 3,58 millions de tonnes de déchets incinérés, composés essentiellement de déchets urbains non recyclables, de déchets de chantier combustibles et de boues d'épuration qui, cumulés à d'autres déchets combustibles, ont couvert environ 3,2 % de la consommation totale d'électricité de la Suisse et ont produit 2770 gigawatts/heure de chaleur à distance pour l'industrie et les ménages (Hügi, Gerber et al. 2008). Cependant, le pays se trouve aujourd'hui dans une impasse technologique due à la technique de combustion utilisée qui ne permet plus d'améliorer l'efficacité de ce processus de combustion (Spoerri, Lang et al. 2010). Le pays dispose également d'une surcapacité dans ce domaine, ce qui handicape le bon fonctionnement des installations et freine l'essor du recyclage de certains matériaux.

Les coûts du système de collecte et de valorisation des déchets sont difficiles à évaluer, en particulier pour les déchets des entreprises. La moyenne suisse des coûts liés à la collecte sélective ainsi qu'à la collecte et à la combustion des déchets urbains ménagers s'élève à 106 CHF par personne et par an. De plus, ces coûts augmentent en raison des mesures prises pour lutter contre la mise en décharge.

La production de déchets spéciaux fait également l'objet d'une statistique fédérale. Depuis l'an 2000, on constate que le volume total des déchets spéciaux en Suisse s'est stabilisé aux environs de 1,1 million de tonnes par an. Les chantiers situés sur des sites contaminés produisent de grandes quantités de terre polluée, qui constitue actuellement la deuxième plus grande part des déchets spéciaux (17%). La plus grande partie (27%) est constituée des déchets à haute valeur calorifique (solvants, huiles de moteur, etc.). En 2005, environ 44 % des déchets spéciaux ont été incinérés, 22 % mis en décharge après traitement adéquat, 27 % ont subi un traitement physico-chimique et 6 % ont été directement valorisés. Les cimenteries assurent l'incinération de quelque 30 % des déchets spéciaux, surtout des huiles de vidange et des solvants, ce qui leur permet d'économiser des matières premières et de l'énergie (Hügi, Gerber et al. 2008).

Au regard des chiffres précédents, il faut reconnaître que le système suisse de gestion des déchets contribue de manière non négligeable à une gestion efficace des ressources naturelles et à la préservation de l'environnement. Cependant, comme déjà mentionné, la surcapacité d'incinération guette la Suisse car elle a pour effet de favoriser l'incinération de matières qui pourraient aujourd'hui être recyclées ou réutilisées, au sens de la hiérarchie des déchets. La Confédération suisse reconnaît qu'il existe un problème de délimitation terminologique entre déchets et matériaux recyclables et admet que le développement de nouvelles technologies pour le recyclage des matières valorisables va probablement faire diminuer la masse incinérée à l'avenir (Hügi, Gerber et al. 2008). Or, un document de la Confédération suisse dont l'objectif est de servir de base à l'élaboration des futures politiques fédérales en matière de gestion de déchets, mentionne la nécessité d'étudier plus avant les possibilités de valorisation de matières premières secondaires (Hanser, Kuster et al. 2006). S'il n'est pas fait explicitement mention des symbioses industrielles dans ce texte, c'est bien de la réutilisation des déchets dont il est question.

1.6.3 Etude de cas n°1 : La République et canton de Genève

Genève est le premier canton suisse à avoir introduit l'écologie industrielle dans ses politiques publiques. Situé à l'extrême ouest du pays, sa surface est seulement de 278.5 km², lacs et rivières inclus. Considéré comme un « état ville », le territoire a la particularité d'être entouré à 95% par une frontière internationale avec la France (Figure 21). Bien qu'occupant seulement 0.6% du territoire national, Genève concentre plus de 8% des emplois, ce qui rend son système industriel très intéressant à étudier. Le tissu économique genevois est constitué de plus de 20'000 entreprises et organismes de droit public. Ces mêmes statistiques indiquent que le tertiaire est l'employeur majoritaire avec 83% des emplois et que le secondaire, avec plus de 4'300 entreprises, représente 16 % des emplois (OCSTAT 2008). La Figure 20 détaille les principaux secteurs d'activité du secteur secondaire (selon la classification NOGA) en fonction du nombre d'employés et l'on constate que la construction, l'horlogerie et l'industrie chimique sont les plus grands employeurs du canton. Il est également intéressant de signaler que cet état de fait est dû à la présence d'un nombre restreint de grands employeurs car 8.7 % des emplois des secteurs du commerce et de l'industrie sont générés par les vingt plus grandes entreprises du canton (OCSTAT 2008). En 2003, une étude du métabolisme des activités économiques avait mis en évidence que le secteur secondaire n'était pas le plus grand consommateur de ressources du canton. Elle soulignait également que la consommation de ressources du secteur secondaire résulte principalement de quelques dizaines de grands industriels bien identifiables qui représentent une cible intéressante (Faist, Frischknecht et al. 2003).

Les activités du secteur secondaire de taille importante ont l'obligation légale d'être situées dans les zones industrielles (ZI), ce n'est pas le cas pour les entreprises plus petites et des secteurs primaires et tertiaires. Les ZI, qui présentent une grande densité d'activité, sont dispersées sur le territoire (Figure 21)

et sont très souvent à proximité de zones d'habitation ou agricoles, ce qui accroît le nombre d'opportunités de valorisation entre ces secteurs.

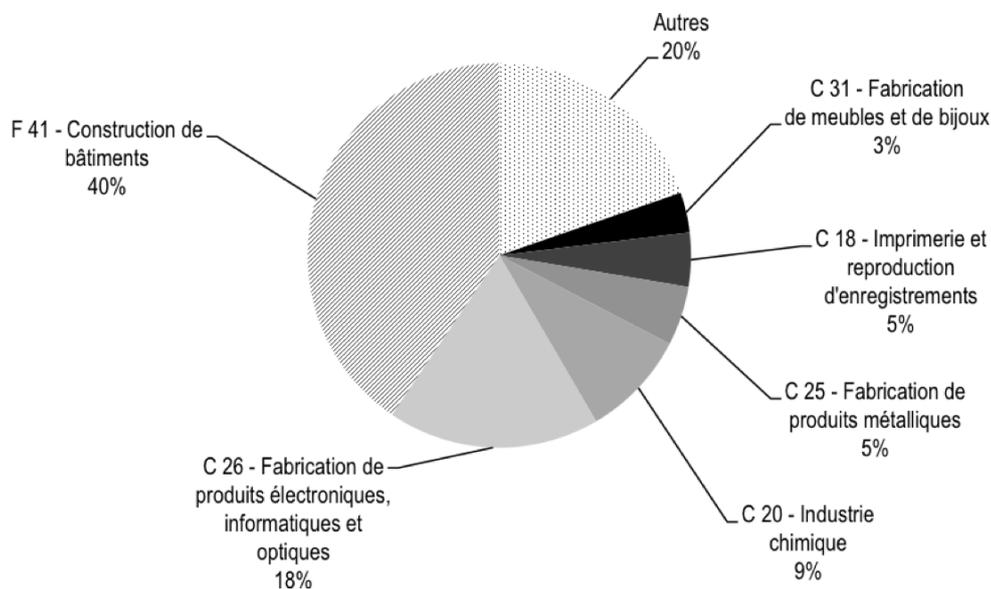


Figure 20 : Principales activités du secteur secondaire à Genève en termes de nombre d'emplois pour l'année 2005. Source : autour, selon OCSTAT, 2005.

1.6.3.1 Le groupe de travail Ecosite

En mai 1996, le Grand Conseil genevois dépose une motion demandant la mise en place d'un Agenda 21 cantonal et en 1999, un rapport de synthèse intitulé « 21 actions pour entrer dans la XXI^{ème} siècle » est établi, sous mandat du Département de l'action sociale et de la santé (DASS), alors dirigé par M. Guy-Olivier Segond (SPE 1999). C'est ce document qui va permettre d'effectuer une consultation publique nécessaire à l'établissement de l'Agenda 21 proprement dit. Cette consultation, réalisée entre mars et août 1999, est ouverte à toute entité active sur le territoire du canton : personnes morales ou physiques, organisations internationales, ONG, etc. Suren Erkman, alors directeur de l'ICAST, interviewé dans le cadre de la consultation, propose d'introduire la notion d'écologie industrielle dans le futur Agenda 21 (SPE 1999).

Votée par le Grand Conseil, la Loi sur l'action publique en vue d'un développement durable (A260 2001) est entrée en vigueur le 19 mai 2001. Elle pose les bases juridiques pour la réalisation d'un Agenda 21 cantonal et a la particularité d'être automatiquement abrogée tous les quatre ans si le Grand conseil n'en a pas actualisé les objectifs. Son article 12, intitulé « Ecosite », directement inspiré de la notion d'écologie industrielle, stipule que :

L'Etat favorise la prise en compte des synergies possibles entre activités économiques, en vue de minimiser leur impact sur l'environnement.

Pour mettre en œuvre l'article 12, le groupe de travail Ecosite a été formé sur mandat du Conseil d'Etat en décembre 2002. C'est un organe de réflexion et de discussion interdépartemental qui a pour objectif la mise en œuvre de l'écologie industrielle sur le territoire du canton et qui vise à intégrer une nouvelle approche des questions d'environnement et de développement économique dans les politiques publiques. Au moment de la rédaction du présent document, le groupe de travail est composé de représentants du Service cantonal de géologie, des sols et des déchets (Gesdec), du Service cantonal de l'énergie (ScanE), du Service cantonal du développement durable, du Service de la promotion économique, de la Direction des bâtiments et de la Fondation pour les terrains industriels (FTI).

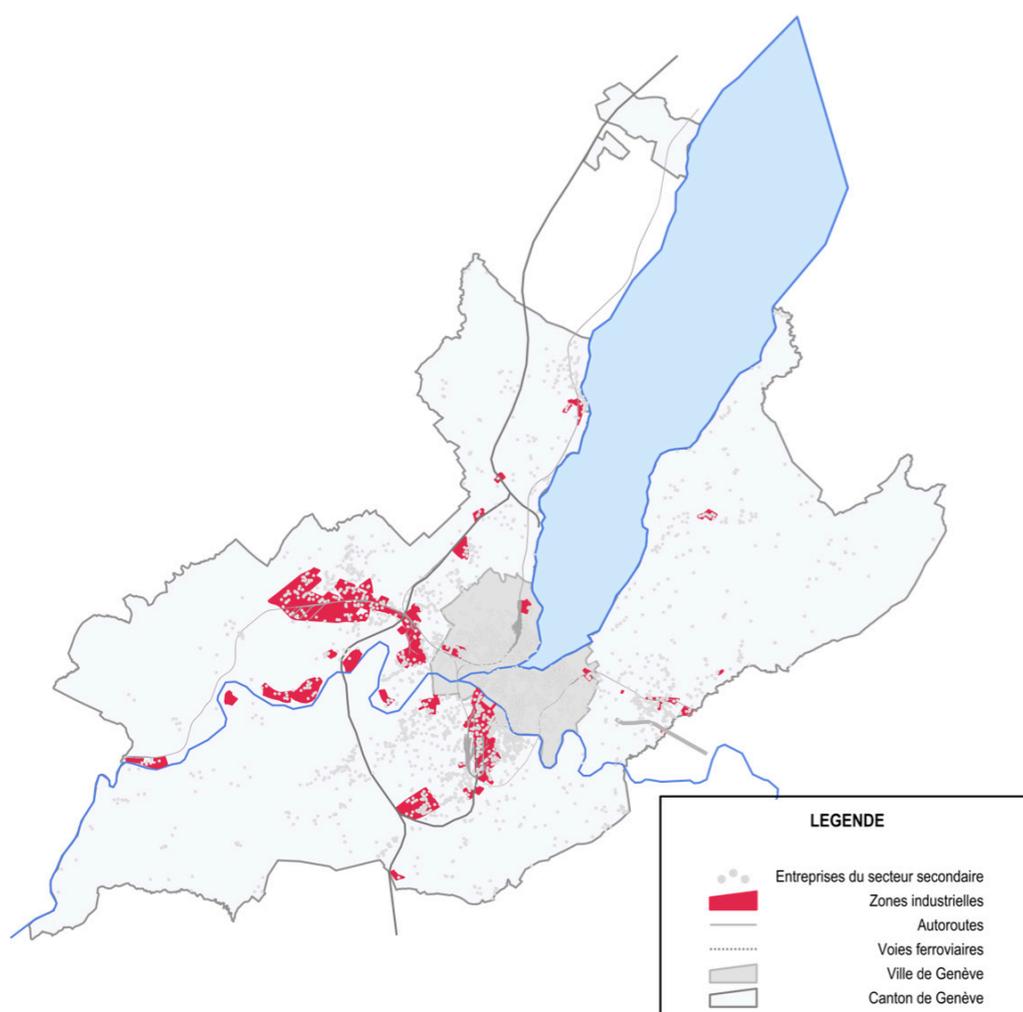


Figure 21 : Le territoire du canton de Genève, l'emplacement des zones industrielles et la répartition des activités du secteur secondaire. Source : auteur, données SITG, 2008

La Figure 22 résume les travaux effectués par le groupe de travail Ecosite depuis sa création en 2001. Le premier objectif a été de déterminer quelles étaient les priorités d'action en termes de gestion des ressources. Le groupe de travail a donc lancé en 2002 une étude de métabolisme des activités économiques, basée sur la méthodologie de l'analyse de flux de matière et d'énergie (Section 1.3.1.1). Confiée aux bureaux de conseil ESU-Services et Maneco, l'étude mesure la consommation de sept ressources indicatrices, et en identifie les principaux consommateurs. Cette étude a mis en évidence l'importante consommation de ressources naturelles de certaines activités économiques du secteur secondaire (Faist, Frischknecht et al. 2003; Erkman 2005).

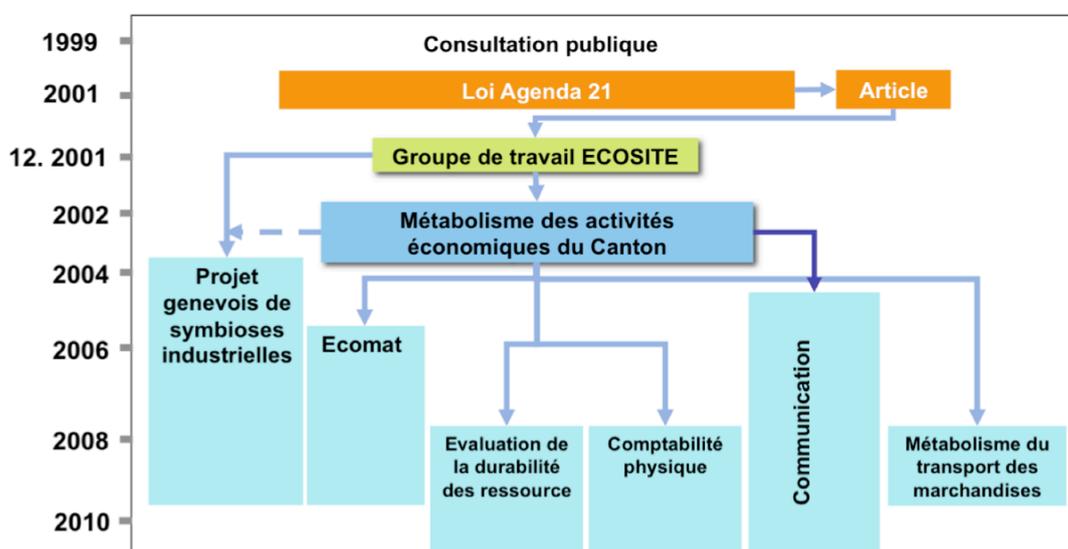


Figure 22 : Historique et actions du groupe de travail Ecosite entre 1999 et 2010. Source : (Charrière, Niwa et al. 2008).

La Figure 23 détaille les flux de matière et d'énergie à Genève pour les sept ressources indicatrices. Ces résultats ont fait l'objet d'une brochure publique qui propose également des pistes pour mettre en œuvre une stratégie concrète de développement durable basée sur la gestion des ressources (Erkman 2005).

En se basant sur les résultats obtenus au cours de l'analyse de métabolisme, le groupe de travail Ecosite a initié six actions (Figure 22) :

1. Un projet pilote de détection et de mise en œuvre de symbioses industrielles. Ce projet est la principale étude de cas utilisée dans le cadre de cette recherche ;
2. La création d'un groupe de travail, Ecomat^{GE}, qui travaille sur les ressources gravières du canton et la modification des filières de gestion des déchets de chantier et de démolition ;
3. Une évaluation de la durabilité de l'usage de ressources afin d'apporter des éléments de réponse sur la consommation de ressources acceptables pour répondre aux objectifs d'un développement

durable. Les travaux en cours à l'Université de Lausanne traitent des problématiques du phosphore et, peut-être à l'avenir, du cuivre ;

4. L'opportunité de la mise en œuvre d'une statistique de l'utilisation de ressources (comptabilité physique) au sein du Service cantonal de la statistique (OCSTAT) ;
5. La rédaction de documents de vulgarisation à l'usage des responsables politiques et du grand public dans un but de sensibilisation ;
6. L'analyse de l'organisation du transport de marchandises et de la logistique des ressources, en s'appuyant sur la méthodologie d'analyse des flux de matière. Cette thématique, qui n'était pas prévue dans le plan d'action, a été ajoutée en 2008.

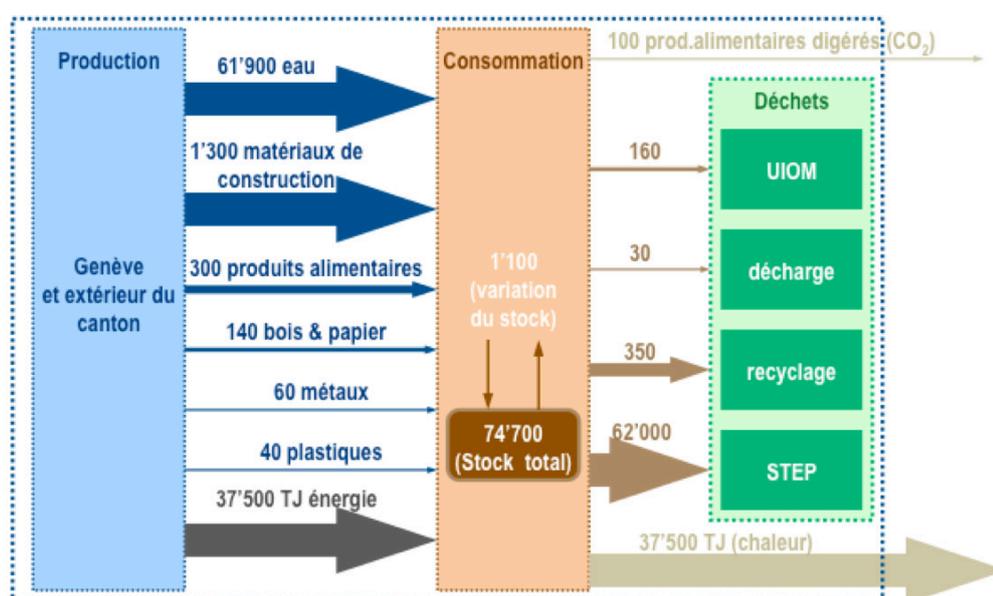


Figure 23 : Consommation de ressources à Genève en 2000. Source : (Faist, Frischknecht et al. 2003).

1.6.3.2 Acteurs impliqués dans le projet genevois de symbioses industrielles

Dès le début de ce travail de recherche, en janvier 2006, nous avons été chargés par le groupe de travail Ecosite de coordonner l'action n°1. Le Professeur Suren Erkman, en tant que consultant externe du groupe de travail Ecosite, a proposé de lier ce projet de recherche académique à la coordination des actions en cours sur le terrain. Entre 2006 et 2010, j'ai ainsi tenu le rôle de coordinateur de terrain d'abord par l'intermédiaire de l'Institut pour la Communication et l'Analyse des Sciences et des Technologies (ICAST), puis par celui du bureau de conseil en environnement SOFIES Sàrl, en partenariat avec le groupe d'écologie industrielle de l'Université de Lausanne.

Avant 2006, la première étape du projet a été menée par le Dr. Cyril Adoue, directeur du bureau de conseil Systèmes Durables Sàrl basé en France, dont la méthodologie avait été développée dans le cadre d'un travail de thèse réalisé à l'Université Technique de Troyes, sous la supervision des professeurs S. Erkman et D. Bourg (Adoue 2004). Cette recherche s'appuie sur les conclusions et les méthodologies développées par Cyril Adoue, dans le but d'en approfondir certains aspects et de faire de nouvelles propositions. Systèmes Durables a également fourni au canton de Genève et à l'Université de Lausanne l'outil de gestion de base de données Presteo permettant de détecter de pistes de symbioses industrielles à partir de bilan de masses d'activités économiques individuelles. A nouveau, la présente recherche a pour objectif d'aller plus loin dans le développement des outils d'aide à la décision appliqués à la gestion des ressources et aux symbioses industrielles.

La Figure 24 décrit les différentes étapes et travaux réalisés entre 2002 et 2010 pour l'action n°1.

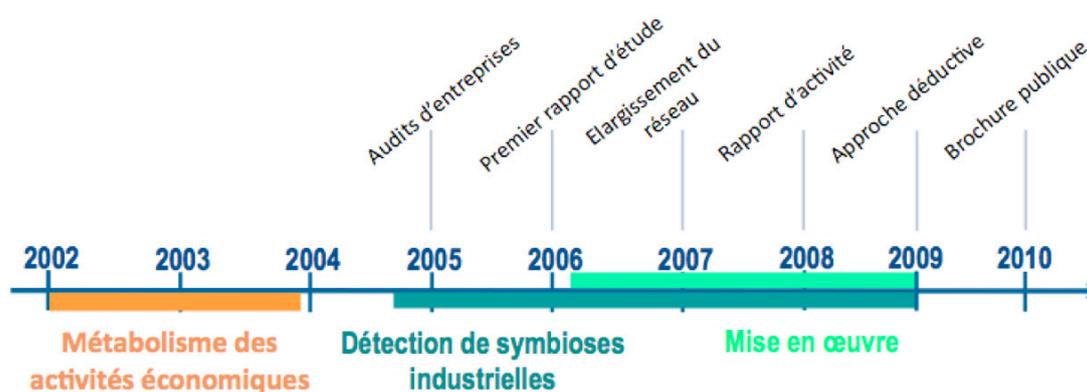


Figure 24 : Calendrier des travaux de terrain et des rapports réalisés pour l'action n°1, traitant de la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles à Genève. Source : auteur.

L'article 12 de la loi Agenda 21 a été modifié à fin 2010. Il s'intitule maintenant « Ressources naturelles ». Sa nouvelle teneur est la suivante: L'Etat œuvre pour la diminution de la consommation des ressources naturelles et la limitation de la dépendance du canton vis-à-vis de ces dernières. A cet effet, il élabore un plan d'action." La décision a en effet été prise d'interrompre les travaux du groupe de travail Ecosite, les objectifs étant atteints.

1.6.4 Etudes de cas n°2 : Le canton de Vaud et Lausanne Région

Le canton de Vaud se situe également en Suisse occidentale. Il a une superficie de 3212 km² et une population de 672'039 habitants en 2007. Les activités économiques secondaires et tertiaires présentes sur son territoire sont principalement regroupées autour des voies de communications et des villes les

plus importantes. Le secteur secondaire se compose principalement d'activités liées à l'industrie manufacturière, à la production et distribution d'électricité ainsi qu'à la construction. Selon les spécialisations de l'industrie manufacturière, les entreprises sont réparties de manière structurée. Les industries du verre, des métaux, de la fabrication de machines et des transports sont situées spécifiquement en zones industrielles tandis que les industries du papier (édition et impression), des produits chimiques et des appareils de bureau sont réparties entre des zones industrielles et urbaines. La production de bois et l'industrie alimentaire sont réparties sur tout le territoire, excepté les zones urbaines et grâce à la production viticole, l'industrie de l'alimentation est notamment très présente sur les rives du Lac Léman. Le secteur tertiaire, composé des services de la santé, de l'éducation, des commerces, des restaurants et de l'hôtellerie est également réparti de façon homogène sur le territoire, alors que les activités économiques qui touchent la finance et le domaine foncier sont rassemblées dans les centres villes (Jobin 2008).

Le chef lieu du canton de Vaud, Lausanne, sur les bords du Lac Léman, constitue le point central de cette deuxième étude de cas. Lausanne est la deuxième plus importante ville de Suisse romande avec une population de 128'000 habitants permanents en 2008. Sa situation sur les grands axes routiers et ferroviaires (Genève-Bâle et Genève-Berne-Zürich), donc son emplacement stratégique, en fait une des places importantes de l'économie suisse, position encore améliorée par la présence de l'UNIL ainsi que de l'EPFL, pôles d'enseignement et de recherche très importants. Comme la commune de Lausanne abrite peu d'activités du secteur secondaire c'est le secteur délimité par Lausanne Région, office régional de promotion économique qui regroupe 29 communes et comprend 240'000 habitants, qui a été retenu pour cette étude. La Figure 25 représente les limites géographiques de l'étude, les zones industrielles présentes sur le territoire, ainsi que les activités économiques disponibles dans la base de données géoréférencée fournie par l'administration cantonale.

1.6.4.1 *Historique et acteurs du projet*

Le canton de Vaud s'est doté en 2006 d'un Agenda 21, concrétisant ainsi sa volonté de s'orienter vers un développement durable. La Ville de Lausanne a signé dès 1998 la charte d'Aalborg (Charte des villes européennes pour la durabilité), s'engageant à mettre en œuvre un programme de développement durable et s'est dotée, en 2000, d'un Agenda 21. La volonté de favoriser un usage rationnel de l'énergie est cependant plus ancienne. Comme l'indique son site internet¹⁷, la Ville encourage, depuis vingt ans déjà, un usage rationnel de l'énergie et l'utilisation des ressources les moins polluantes. Bien qu'elle ne mentionne pas explicitement les symbioses industrielles, contrairement à la législation genevoise, la politique environnementale lausannoise en énonce cependant les principes, et ouvre la voie à leur

¹⁷ <http://www.lausanne.ch>, site consulté le 25 juillet 2010

réalisation. Actuellement, les autorités politiques lausannoises se caractérisent par leur orientation écologique marquée.

En octobre 2006, les Services Industriels de Lausanne (SIL) ont mandaté l'Institut de Politiques Territoriales et d'Environnement Humain (IPTEH) de l'Université de Lausanne pour mettre en œuvre des projets d'écologie industrielle sur le territoire de Lausanne Région et il a été décidé de réaliser une étude préliminaire, traitant deux aspects distincts mais néanmoins liés : une étude de métabolisme des activités économiques réalisée selon la même méthodologie que dans le cas du canton de Genève et une démarche pilote de détection de symbioses industrielles. La Figure 26 décrit les différentes étapes du projet entre 2006 et 2008.

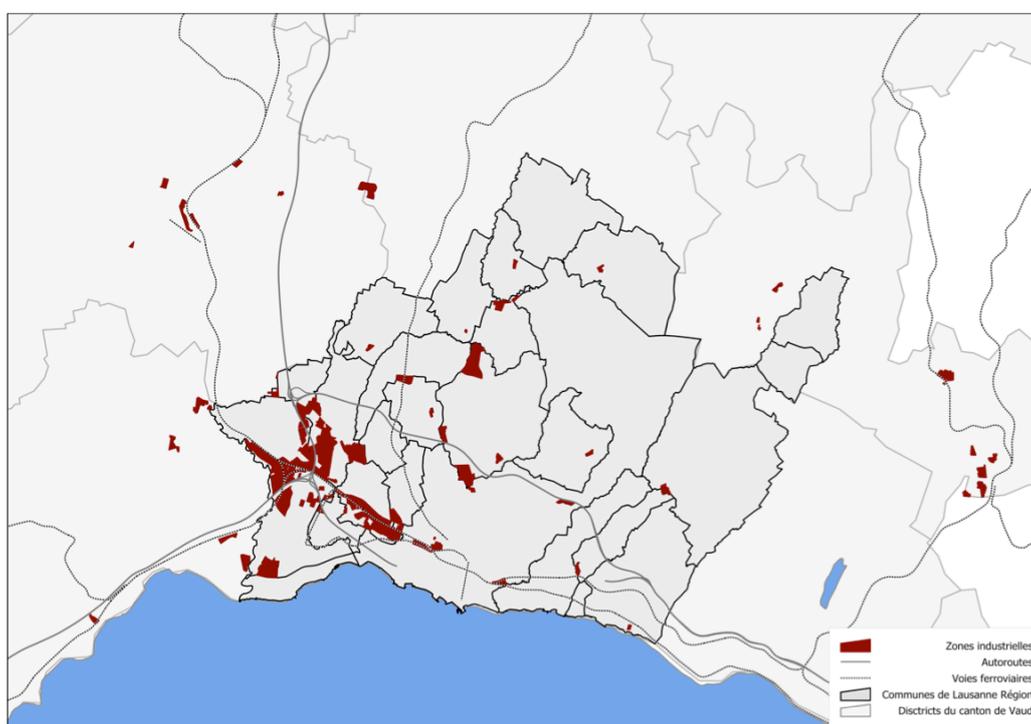


Figure 25 : Le territoire du canton de Vaud et détail de Lausanne Région, territoire du projet pilote utilisé comme étude de cas dans le canton de Vaud. Source : auteur, données UNIL.

La Figure 27 présente les résultats partiels de l'analyse de flux de matière. Elle met en évidence l'importance des flux de matériaux de construction pour l'année 2006 (Barthelemy 2008).

Seule la thématique des symbioses industrielles est utilisée comme étude de cas pour ce travail de recherche. Un travail de semestre ainsi qu'un travail de diplôme UNIL / EPFL, ont été réalisés par Baptiste Antille (Antille 2007). Les résultats de cette première phase ont été rendus en août 2007 sous la forme d'un rapport intitulé « Détection de synergies éco-industrielles sur le territoire de Lausanne Région ». Ce rapport a mis en évidence un certain nombre de pistes de symbioses industrielles, mais également les lacunes du projet après quatre mois de travail. Les SIL ont ainsi mandaté l'IPTEH à l'automne 2007 afin

d'approfondir la collecte de données et l'analyse des synergies potentielles. Finalement en mai 2008, 21 rapports individuels présentant les opportunités détectées ont été envoyés par l'IPTEH aux entités économiques du projet (Figure 26).

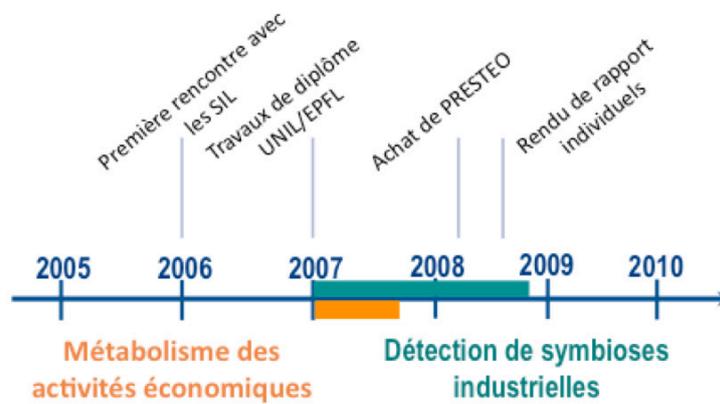


Figure 26 : Calendrier des travaux de terrain et des rapports réalisés pour le projet pilote de Lausanne Région. Source : auteur.

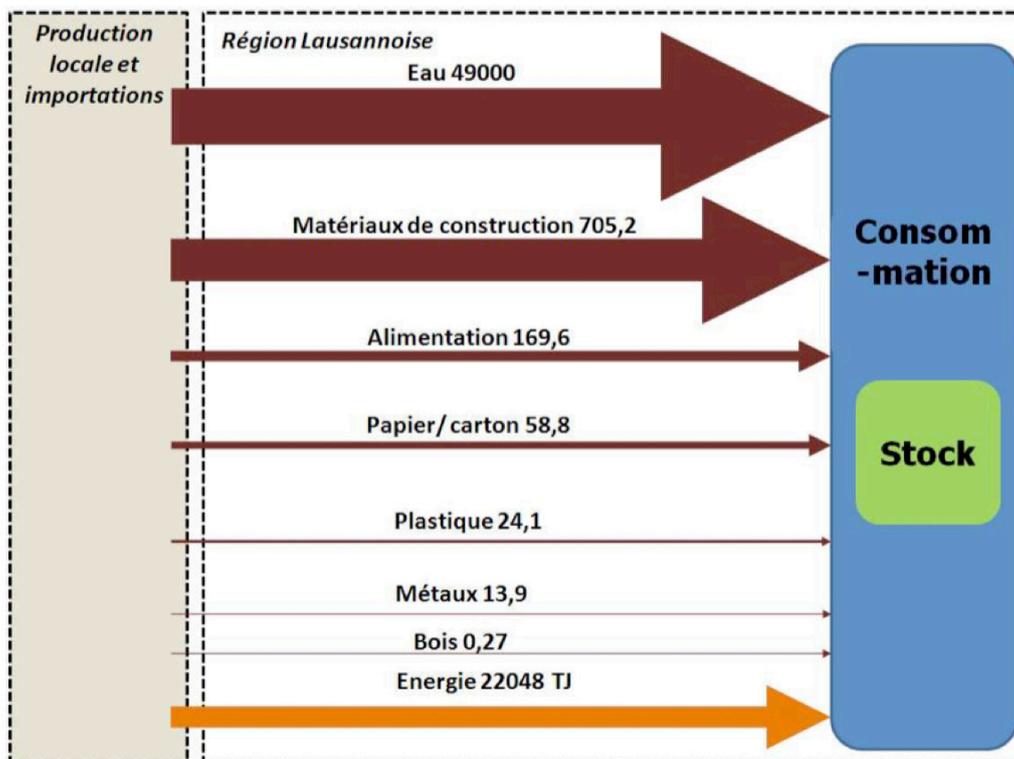


Figure 27 : Etude de métabolisme des activités économiques sur le territoire de Lausanne Région en milliers de tonnes par an pour l'année 2005. Source : (Barthelemy 2008).

Chapitre 2.

PROCEDURES DE DETECTION ET DE MISE EN ŒUVRE DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES SUR UN TERRITOIRE

2.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Les premières expériences de symbioses industrielles ont principalement été le fruit d'initiatives individuelles ou d'un petit groupe d'acteurs ayant compris les avantages de la collaboration entre entreprises. Le développement continu du réseau de symbioses industrielles à Kalundborg (Section 1.4.6.1) depuis les années 1970 est issu des acteurs économiques eux-mêmes jusqu'à la création du Symbiosis Institute en 1996 à l'initiative de l'ICAST (Jacobsen et Anderberg 2004; Jacobsen 2006). Il en a été de même en Chine, dans le cas du Guitang Group (Zhu et Côté 2004). Les systèmes industriels ne s'organisent cependant que rarement de leur propre initiative de la manière la plus efficace. Il en va de même en ce qui concerne la gestion des ressources. L'évolution actuelle du système industriel se caractérise du reste par de nombreuses pratiques allant à l'encontre de la durabilité (Boons et Baas 1997; Baas 2008).

En se référant aux éléments présentés dans le Chapitre 1, il apparaît aujourd'hui évident que l'épuisement des ressources va obliger les acteurs économiques à modifier leur habitudes. Or, les entreprises seules, sauf dans des cas bien particuliers, n'ont pas aujourd'hui la volonté, les ressources et les connaissances nécessaires pour étudier de manière autonome les possibilités de synergies qui les entourent. Cependant, que les motivations soient d'ordre économique, sociale ou environnemental, il n'est pas possible d'attendre encore plusieurs décennies pour voir émerger de nouvelles symbioses industrielles à l'initiative exclusive des acteurs privés. Il apparaît nécessaire d'accélérer le développement de nouveaux projets en accompagnant les entreprises dans la mise en œuvre de solutions efficaces.

La question qui se pose alors est la suivante : comment orienter les prises de décisions afin d'influencer le système industriel et modifier la circulation des flux de matière et d'énergie qui le compose afin d'aboutir à la création de symbioses industrielles ? La réponse à cette question consiste à créer les conditions nécessaires pour accélérer la transition industrielle prônée par l'écologie industrielle. Ce chapitre a pour objectif de relier les dimensions techniques et sociales pour favoriser l'émergence de symbioses industrielles sur un territoire. En particulier, il s'agit d'énoncer les éléments à prendre en compte pour

étudier et soutenir l'émergence de symbioses industrielles dans le contexte suisse et de déterminer quels rôles peuvent jouer les différents acteurs publics et privés du territoire.

Les éléments méthodologiques et procéduraux présentés dans ce chapitre s'appuient sur le travail réalisé en 2004 et 2005 par Cyril Adoue dans le cadre du projet pilote de Genève. Ce dernier a participé à lancer une démarche de détection de symbioses industrielles sur le territoire du canton en formant deux auditeurs d'entreprise, dont je faisais partie et en détectant les premières pistes de synergies. Entre 2006 et 2010, j'ai tenu le rôle de coordinateur du projet, en charge de l'analyse et de la mise œuvre de pistes détectées par Adoue. Comme nous le verrons par la suite, le rôle de coordinateur est un élément central des développements proposés dans la suite de ce chapitre. L'objectif principal de ce chapitre est de décrire et de commenter les procédures de terrain mises en place en Suisse romande entre 2004 et 2009, puis d'en proposer de nouvelles.

Le chapitre s'organise de la manière suivante. Premièrement, une revue de littérature spécifique à la mise en œuvre de projets sur le terrain est proposée. Elle est centrée sur une approche proactive de la problématique de la gestion des ressources et sur la mise en œuvre de symbioses industrielles. Elle définit les différentes manières dont le rôle de coordinateur peut être appréhendé. Deuxièmement, une méthodologie d'audit d'entreprise et de collecte des données sur les flux de matière entrants et sortants est proposée (Section 2.3). Troisièmement, les paramètres influençant la mise en œuvre des synergies sont détaillés dans le contexte suisse (Section 2.4). Quatrièmement, les tâches du coordinateur, dont le rôle est de créer et d'animer un réseau social inter-entreprises sont décrites pour deux procédures de terrain distinctes (Section 2.5). Finalement, l'application des développements précédents est discutée et critiquée dans le cadre des projets pilotes de Genève et de Lausanne Région, utilisé comme études de cas dans cette thèse (Section 2.6) et une nouvelle procédure est proposée sur la base d'une analyse du contexte suisse et de la perception des symbioses industrielles des deux principaux groupes d'acteurs : les pouvoirs publics et le secteur privé (Section 2.7).

2.2 REVUE DE LITTÉRATURE

2.2.1 Facteurs sociaux et territoriaux influençant la mise en œuvre des symbioses industrielles

Par essence, la mise en œuvre des stratégies de maturation du système industriel implique une approche systémique de la gestion des ressources. Si de nombreuses entreprises ont aujourd'hui adopté des objectifs liés à la durabilité, l'évolution du système dans son ensemble est ralentie par les facteurs économiques, environnementaux et sociaux (Fiksel 2003). Selon Boons et Baas (1997), la modification des habitudes de consommation des ressources requière une approche multi organisationnelle et des prises de décisions conjointes entre les milieux politiques et les organes de gestion des activités économiques. Or, la concrétisation d'une telle approche implique de considérer le contexte économique, institutionnel et culturel, ainsi que la structure sociale du territoire considéré. En effet, l'aboutissement d'une collaboration est le fruit d'une intense négociation entre des acteurs ayant des différences importantes de connaissances et d'intérêts (Baas 2008). Ainsi, selon Boiral et Kabongo (2004) :

Le succès de ces pratiques dépend, en grande partie, de la maîtrise de connaissances et de savoir-faire qui s'inscrivent dans une démarche d'apprentissage organisationnel irréductible aux seuls aspects technologiques.

Ainsi, les entreprises jouent un rôle primordial dans le développement des stratégies d'optimisation des ressources (van Berkel, Willems et al. 1997; Allenby 1999). Mais, l'intensité et la qualité de la coopération entre les acteurs d'un territoire sont des éléments essentiels pour parvenir à la modification des habitudes des entreprises (Heeres, Vermeulen et al. 2004).

De nombreuses recherches sur les facteurs de réussite liés à la mise en œuvre de symbioses industrielles, le développement des réseaux d'échanges des matériaux et la modification des mécanismes réglementaires ont été réalisées à la fin des années nonante déjà (Tibbs 1993; Ehrenfeld et Gertler 1997; Côté et Cohen-Rosenthal 1998; Allenby 1999). Plus récemment, le milieu académique s'est intéressé aux mécanismes influençant les liens sociaux entre acteurs du territoire et aux défis auxquels sont confrontés les organisations en phase de transformation. Ce constat est d'autant plus important que les facteurs clés dont dépendent la concrétisation d'une collaboration dans le domaine des symbioses industrielles sont la communication, la confiance et la volonté (Chertow 2000). Mirata (2004) ajoute que les contraintes relatives à leur mise en œuvre sont d'ordre technique, politique, économique et financier, social (transfert d'information, motivation) et organisationnel.

Dans leurs récentes recherches Boons et Howard-Grenville (2009) définissent six mécanismes influençant les liens sociaux liés aux processus de décision dans le domaine de l'écologie industrielle : les mécanismes cognitif, culturel, structurel, politique, spatial et temporel. Ces deux derniers éléments

insistent sur la manière dont la proximité géographique et le temps influence les interactions entre les institutions d'un territoire et ses acteurs économiques. Dans le même ouvrage, Chertow et Ashton (2009) détaillent ces six mécanismes en portant une attention particulière sur leur influence pour l'émergence de symbioses industrielles. A partir de ces deux références, les paragraphes suivants définissent ces six dimensions.

Le mécanisme *cognitif* s'intéresse aux mécanismes de la pensée chez l'être humain. En science cognitive, le terme cognition est utilisé pour désigner le raisonnement, la mémoire et la prise de décision, mais également la perception, la motricité et les émotions. Ainsi, dans le contexte qui nous intéresse, le mécanisme cognitif traite des limites des processus mentaux des individus dans la prise de décision lorsqu'ils sont confrontés à des incertitudes, une certaine complexité et des informations limitées. Son étude permet de comprendre pourquoi et comment certaines décisions et actions sont prises au sein d'entreprise. En ce qui concerne la mise en œuvre de symbioses industrielles, Marian Chertow et Weslyne Ashton (2009) expliquent que le mécanisme cognitif se définit comme la distance mentale entre les décideurs du milieu économique pour percevoir les opportunités de collaboration dans le domaine de la gestion des ressources. En d'autres termes, plus deux individus appartenant à deux entreprises distincts se connaissent, plus le lien de confiance entre eux est potentiellement fort (petite distance mentale). Dans ce cas, la prise de décision, concernant par exemple la mise en œuvre d'une symbiose industrielle, sera plus rapide et les risques seront évalués au travers de cette relation de confiance. Lorsque deux individus ne se connaissent pas (grande distance mentale), l'évaluation des risques liés à la prise de décision est plus complexe et prend donc plus de temps.

Le mécanisme *culturel* détaille l'influence de la compréhension collective et des normes partagées sur les comportements économiques et organisationnels. Il s'agit d'une approche collective, ce qui le différencie du contexte cognitif. La compréhension du contexte culturel permet de déterminer ce qui est légitime et acceptable pour un certain secteur d'activité social, politique, économique ou organisationnel. Elle peut se faire à différentes échelles géographiques. Ainsi, pour une entreprise réfléchissant à la mise en œuvre d'une symbiose industrielle, le contexte culturel va déterminer la définition et la perception du déchet, ainsi que la volonté de coopérer à des réflexions sortant du cadre de l'entreprise.

En se basant sur les deux mécanismes précédents, il est intéressant de caractériser les relations entre acteurs économiques. Le mécanisme *structurel* permet de contextualiser les échanges économiques en fonction de l'état des relations entre individus ou organisations. Il tient compte de la structure des interactions sociales et étudie comment l'information et les relations d'influence affectent les échanges. Dans le sujet qui nous occupe, le contexte structurel détaille la nature et l'intensité des relations sociales entre acteurs du territoire. Ainsi, la densité des interactions au sein d'un réseau d'acteurs et l'importance de certains d'entre eux par rapport aux autres renseigne sur les jeux d'influence et les acteurs clés d'un territoire. De nombreux auteurs ont utilisé l'analyse de réseaux sociaux pour comprendre le développement des réseaux de symbioses industrielles (Baas et Boons 2004; Jacobsen et Anderberg 2004; Ashton 2008).

Les mécanismes *politiques* traitent de la manière dont les institutions économiques et les décisions sont façonnées par les différentes parties disposant d'un certain pouvoir de décision, en particulier les acteurs économiques et les pouvoirs publics, sans oublier les autres organisations comme les associations professionnelles, les chambres de commerces et les partis politiques. Selon Frank Boons et Jennifer Howard-Grenville (2009), cette opposition entre acteurs privés et publics reflète une certaine vision du pouvoir qui doit être considérée en lien avec la compréhension des politiques publiques. Ils insistent également sur l'influence des agences régionales de développement, des organisations telles que l'ordre des avocats, des syndicats et de toute autre communauté sur la manière dont agissent les entreprises. En résumé, il s'agit des relations de pouvoir entre les acteurs d'un territoire à travers les politiques publiques et la législation environnementale. Plusieurs auteurs mentionnent en parlant de l'expérience de Kalundborg, l'importance du contexte législatif danois, mettant en évidence l'influence majeure de la législation et donc des politiques publiques sur la mise en œuvre des échanges (Ehrenfeld et Gertler 1997; Jacobsen et Anderberg 2004).

Les deux dernières dimensions, *spatiale* et *temporelle* peuvent être abordées conjointement. Dans un contexte économique et industriel en évolution rapide, elles s'intéressent à la manière dont la proximité géographique et le temps influencent les interactions entre acteurs. La proximité est un facteur clé dans le domaine des symbioses industrielles. En plus de la faisabilité technique d'une collaboration, elle a une influence primordiale sur les échanges d'informations et l'établissement des liens de confiance mentionnés par Marian Chertow et Weslyne Ashton (2009). La dimension spatiale a donc un impact considérable sur les interactions entre acteurs. Plus le territoire considéré est vaste, plus le nombre d'acteurs et d'institutions à prendre en compte est important. De manière similaire, l'intensité des échanges dans le temps, non seulement pérennise l'économie de ressources, mais influence, et le plus souvent renforce, les quatre autres mécanismes sociaux mentionnés précédemment. Marian Chertow et Weslyne Ashton (2009) limitent cependant l'influence de ces deux mécanismes dans le contexte des relations inter-entreprises. En définissant le spatial comme « *la proximité entre les activités économiques et la disponibilité des ressources* » et le temporel comme « *l'évolution de la quantité et de la qualité des synergies au cours du temps* », elles minorent l'influence de l'espace et du temps sur l'ensemble des organes et des acteurs d'un territoire et sur les processus d'apprentissage organisationnel dans leur ensemble.

Ainsi, il apparaît comme pertinent d'ajouter à ce constat l'évolution temporelle des cinq premiers mécanismes, ce qui inclut l'évolution de l'organisation spatiale du territoire, et de ne pas se limiter à l'évolution des synergies. La multiplication des institutions et des acteurs d'un territoire implique un suivi constant de leur action, et ce afin d'éviter les égarements, les doublons et la répétition de certaines actions à intervalles réguliers, pas seulement dans le contexte des symbioses industrielles, mais pour l'ensemble des questions liées aux changements sur un territoire. L'évolution des mécanismes cognitif, culturel, structurel et politique au cours du temps va donc avoir une influence importante sur les prises de position des acteurs économiques et leur motivation à s'impliquer dans des relations inter-entreprises,

mais également dans tous types de projets en lien avec la gestion des ressources. Ils peuvent ainsi représenter des barrières ou des opportunités.

Les considérations précédentes soulignent l'importance du contexte dans lequel peut émerger un projet afin de maximiser ces chances de succès. La compréhension de ces mécanismes permet d'acquérir des connaissances approfondies sur l'organisation du système industriel et les raisons de son fonctionnement à un instant donné. En particulier, une bonne connaissance de celui-ci permet de détecter les symbioses industrielles pré-existantes, qui sont reconnues comme des éléments facilitant l'émergence de nouvelles collaborations (Chertow 2007).

L'objectif de ce chapitre est de favoriser l'émergence de symbioses industrielles sur un territoire. Un contexte législatif mêlant restriction et incitation ne suffit cependant pas pour faire émerger les solutions les plus pertinentes (Lowe 1997; Adoue 2004; Mirata 2004; van Beers, Corder et al. 2007; Costa et Ferrão 2010). Cette considération a abouti au développement simultané, dans plusieurs régions du monde, de procédures destinées à faciliter et à accélérer le développement de symbioses industrielles dans des contextes culturel, politique, structurel et cognitif différents.

La revue de littérature du Chapitre 1 permet maintenant de détailler plusieurs projets en fonction des principaux facteurs pratiques influençant la mise en œuvre d'un projet de symbioses industrielles. Par projet de symbioses industrielles, nous entendons ici la mise en place d'une démarche proactive destinée à créer des nouvelles symbioses sur un territoire. La comparaison est effectuée sur la base de quatre critères proches des éléments cités par Mirata (2004), identifiés comme des soutiens possibles pour le développement de procédures d'action sur le terrain. Elle renseigne sur les succès et échecs des différentes approches utilisées. Les critères que nous avons retenus dans le cadre de cette recherche sont :

1. L'origine de l'initiative et son financement ;
2. Le type de gestion de projet ;
3. L'utilisation de systèmes d'information pour la gestion des données et l'aide à la décision ;
4. Les objectifs et modalités de la procédure utilisée pour la détection d'opportunités et leur mise en œuvre.

2.2.1.1 *Origine de l'initiative et du financement*

Il est possible de classer les projets en empruntant des termes au domaine de l'analyse des systèmes (Duchin, Levine et al. 2008). L'approche *top-down* regroupe les méthodologies permettant la description et la compréhension d'un système global existant. Dans le domaine de l'écologie industrielle, il s'agit par exemple de l'analyse des flux de matière et d'énergie. Cette connaissance peut ensuite être utilisée pour initier un programme d'optimisation du système considéré et de ses sous-systèmes. A l'opposé, l'approche *bottom-up* est une stratégie utilisant les connaissances disponibles concernant un sous-

système pour influencer l'évolution du système dans son ensemble. Dans le domaine de l'écologie industrielle, cela peut être interprété comme une manière de diffuser les bonnes pratiques et de répliquer les expériences réussies en termes de produits respectueux de l'environnement et d'usage des ressources (Duchin, Levine et al. 2008).

Appliqué au domaine des symbioses industrielles, une initiative peut être qualifiée de *top-down* lorsque les pouvoirs publics prennent l'initiative pour améliorer leur connaissance des flux de matière et d'énergie au sein des activités économiques dans le but de les optimiser ou lorsque les optimisations recommandées sont complètement ou partiellement imposées par des contraintes légales. De même, une entreprise possédant une position dominante sur un marché ou un territoire peut mettre en œuvre une approche *top-down* de sa propre initiative, par exemple lorsqu'une entreprise disposant de nombreux sous-traitants et de fournisseurs leur impose des conditions d'ordre environnementales pour améliorer son propre bilan environnemental et son image. Ces définitions dépendent donc des acteurs et du territoire considéré. Respectivement, elle peut être qualifiée de *bottom-up* en cas d'initiative locale initiée par un groupe d'acteurs privés sans recourir à l'aide de l'Etat.

Dans la culture nord américaine, la première approche a été souvent considérée sous l'angle de la planification industrielle (Chertow 2007). Le *top-down* a montré ces limites à la fin des années 90 dans cette région du globe dans le contexte de projets de construction de parcs éco-industriels initiés par l'administration Clinton (Gibbs et Deutz 2005). Cet échec est néanmoins en grande partie dû au contexte politique, structurel et culturel en Amérique du nord. La deuxième approche caractérise les premières expériences de symbioses industrielles réalisées sans soutien d'aucune sorte. C'est le cas entre autres de Kalundborg (Ehrenfeld et Gertler 1997; Jacobsen et Anderberg 2004) et du Guitang Group (Zhu, Lowe et al. 2007).

La nécessité d'accélérer l'essor des symbioses industrielles fait aujourd'hui l'objet d'un consensus global. Cependant, il apparaît difficile de simplement imposer un nouveau modèle économique restrictif aux entités économiques. La découverte de symbioses industrielles mises en place à l'initiative des entreprises elles-mêmes a créé un intérêt pour le développement de nouveaux réseaux de symbioses industrielles sur des territoires où il n'en existe pas encore. Un grand nombre d'initiatives ont ainsi émergé, impliquant des acteurs publics et privés dans une approche pluridisciplinaire (Lowe 1997; Chertow 2007). Le plus souvent, les pouvoirs publics analysent le système industriel, mettent en évidence des opportunités, mais laissent ensuite les entités économiques prendre l'initiative de la mise en œuvre. Ces projets constituent une forme d'apprentissage organisationnel. P. Quintas, P. Lefrere et G. Jones (1997) définissent la gestion des connaissances et l'apprentissage organisationnel de la manière suivante :

*La gestion des connaissances et le processus continu de management des savoirs de tout ordre afin de répondre aux besoins existants et émergents, d'identifier et exploiter l'actif de connaissance acquis et développer de nouvelles opportunités.*¹⁸

Olivier Boiral et Jean Kabongo ajoutent (2004) :

Compris comme étant le processus d'acquisition, de diffusion et de production de connaissances permettant à une organisation de s'adapter collectivement aux changements de l'environnement et de promouvoir de nouvelles pratiques, l'apprentissage organisationnel semble inhérent aux mesures de réduction et de valorisation des résidus industriels.

La mise en place de symbioses industrielles requière la création de liens sociaux ainsi que de processus d'échange d'informations et de collaboration entre entreprises (Adoue 2004). Les synergies demandent donc un apprentissage collectif de nouvelles pratiques et de nouvelles technologies. L'apprentissage organisationnel peut ainsi encourager leur émergence en impliquant tous les acteurs d'un territoire autour de nouvelles connaissances sur les flux de matière et d'énergie.

L'origine de l'initiative revêt donc une importance particulière. Le succès d'un projet en dépend en bonne partie. L'origine des instigateurs du projet est directement influencée par les mécanismes politiques du territoire considéré. Leur évolution dans le temps va d'ailleurs indirectement agir sur les mécanismes cognitifs, structurels et culturels, reflétant la motivation des acteurs économiques. En d'autres termes, les personnes et les organismes en charge de développer le projet doivent être choisis en tenant compte de l'histoire du territoire et de leur capacité à organiser les transferts d'information à l'intérieur des activités économiques et entre elles.

A l'heure actuelle, la plupart des projets sont guidés par des experts externes aux entreprises, issus des institutions publiques, du milieu académique ou de bureaux de conseil privés. La création du Kwinana Industries Council (KIC), regroupant les industriels de la zone du même nom, relève d'une initiative des entreprises de la région conscientes des avantages économiques et environnementaux procurés par la collaboration dans le domaine de l'usage durable des ressources. Or, celles-ci ont participé au financement d'une chaire de recherche destinée à soutenir la mise en œuvre des projets (van Beers, Corder et al. 2007). Le NISP, au Royaume-Uni, est financé par des fonds publics qui soutiennent l'action de consultants privés sur le terrain (Mirata 2004; Costa, Massard et al. 2010). Le projet Eco-town au Japon implique l'administration publique, qui finance le projet, ainsi que le milieu académique et le secteur privé (van Berkel, Fujita et al. 2009).

En conclusion, la plupart des projets documentés actuellement et destinés à favoriser l'essor de symbioses industrielles sont aujourd'hui financés et réalisés grâce à des fonds publics, soit en recourant

¹⁸ Traduction de l'auteur selon (Quintas, Lefrere et al. 1997) :

Knowledge management is the process of continually managing knowledge of all kinds to meet existing and emerging needs, to identify and exploit existing and acquired knowledge assets and to develop new opportunities.

directement aux ressources humaines de l'administration, soit par l'intermédiaire du milieu académique et du secteur privé. Ceux-ci peuvent provenir de différents organismes à l'échelle supra-nationale (ONU, ONUDI), nationale, régionale (états) ou locale (villes et municipalités).

2.2.1.2 *Type de gestion et de coordination de projet*

Les considérations sur l'origine de l'initiative et du financement démontrent l'importance de disposer d'un organe de coordination adapté. Cette question a été beaucoup discutée dans la littérature spécialisée (Ehrenfeld et Gertler 1997; Lowe 1997; Baas 1998; Hewes 2005; Costa et Ferrão 2010; Grant, Seager et al. 2010). La symbiose industrielle de Kalundborg est connue pour être un non-projet, réalisé sans disposer d'un organe centralisé de coordination. Le développement, étalé sur plusieurs décennies, est le résultat des préoccupations successives de manager et non d'une recherche systématique de solutions (Ehrenfeld et Gertler 1997). Cette situation a cependant changé depuis la création du Symbiosis Institute en 1996.

La participation à un projet de recherche mené par Gabriel Grant de l'Université de Yale nous a permis de distinguer quatre modèles d'interactions entre les entreprises prenant part à un projet de symbioses et les systèmes d'information destinés à soutenir les décisions¹⁹. Les modèles analysés par Grant se distinguent par une variation dans le degré de contrôle du projet. Du plus fort contrôle au plus faible, nous trouvons : *planificateur/designeur*, *facilitateur*, *facilitateur de réseau* et *participant*. Pour plus d'informations, il est recommandé de consulter la publication originale (Grant, Seager et al. 2010).

L'approche du *planificateur/designeur* consiste en la centralisation de l'information en un nœud central qui se trouve devenir le cœur du projet et du réseau d'échange d'informations entre les participants. Il s'agit d'un processus d'optimisation et de planification. Le coordinateur de projet propose alors aux participants un modèle optimisé du système industriel issu de réflexions techniques, économiques et environnementales. Le désavantage de cette approche est de créer un goulot d'étranglement pour les flux d'informations qui transitent alors automatiquement par l'organe de coordination du projet. Le succès ou l'échec de ce modèle dépend des mécanismes cognitif, structurel et politique en place sur le territoire considéré et de leur évolution dans le temps. Il découle également des outils à disposition de l'organe de coordination. Les aspects structurels et politiques spécifiques à l'Europe et à la Suisse font que les pratiques de planification font de plus en plus appel au principe de l'apprentissage organisationnel et aux concertations publiques pour mettre en œuvre les solutions proposées.

Le modèle du *facilitateur* est proche du précédent. Un ou plusieurs coordinateurs sont en charge de la collecte des données et de la recherche de solutions optimisées qui sont ensuite communiquées aux entreprises participantes. La différence consiste en la création de liens directement entre les participants.

¹⁹ Les considérations spécifiques aux systèmes d'informations sont traitées dans le Chapitre 3, Section 3.1.2, en lien avec le développement d'un nouvel outil.

Ces derniers peuvent alors discuter les solutions proposées directement entre elles et ainsi évaluer plus rapidement des contraintes techniques, légales et économiques liées à leur mise en œuvre. Le rôle du facilitateur est ainsi double. Premièrement, il consiste à entretenir constamment la dynamique de collaboration et d'échange d'informations entre les entreprises. Un projet de symbioses industrielles peut durer plusieurs années, maintenir la motivation des acteurs n'est donc pas une tâche aisée. Nous y reviendrons dans la suite du chapitre. Deuxièmement, le coordinateur est responsable de la dissémination au sein de l'entreprise, des innovations techniques destinées à améliorer l'efficacité de l'usage des ressources.

La troisième approche est celle du *réseau de facilitateurs*. S'il est proche du modèle précédent, il se caractérise par l'existence d'un nombre élevé de facilitateurs actifs sur un même territoire. Ceux-ci ont recours un système d'information multi-utilisateurs performant permettant de faciliter la communication non pas entre participants, mais entre coordinateurs. Ce modèle est particulièrement adapté aux grands territoires dont l'intensité des relations sociales directes entre participants est faible et où les pouvoirs publics proposent peu de mécanismes de diffusion de l'information.

Finalement, le modèle du *participant* implique de se concentrer sur la création d'échange d'informations directement entre les activités économiques du territoire. Les coordinateurs sont alors les entreprises elles-mêmes, soutenues par des systèmes d'information multi-utilisateurs, à l'image des réseaux sociaux. Elles identifient les opportunités, les évaluent, établissent le dialogue nécessaire à la mise en œuvre et mettent à disposition des autres utilisateurs leurs bonnes pratiques et leur expérience. Ce modèle demande un engagement volontaire fort de la part des acteurs économiques qui deviennent les sources de l'information et de l'expertise.

Les quatre modèles proposés permettent d'énoncer plusieurs conclusions qui serviront de base pour analyser les procédures de terrain appliquées et développées en Suisse romande depuis 2005. Dans la tendance actuelle, la tâche du coordinateur consiste souvent à fournir des informations pertinentes pour développer les collaborations et assurer le dynamisme à long terme du réseau (van Beers 2006; Paquin et Howard-Grenville 2009; van Berkel, Fujita et al. 2009). Ainsi, le rôle du coordinateur de projet varie entre l'optimisation de systèmes industriels et l'animation de réseaux sociaux. Dans tous les cas, son rôle contient une part d'apprentissage organisationnel. Celui-ci doit également disposer d'un outil propre à bon nombre d'ingénieurs du territoire aujourd'hui: un système d'information adapté à son rôle. L'équilibre entre ces deux éléments dépend des mécanismes structurels, politiques en cours sur le territoire considéré. En particulier, plus les échanges entre acteurs économiques (mécanisme structurel) sont intenses, moins le coordinateur dépense d'énergie pour convaincre ceux-ci de la plus-value apportée par sa proposition.

Dans le contexte Suisse, en recourant à des procédures et à des outils bien définis, un coordinateur analyse techniquement, légalement et économiquement une situation existante et émet des propositions là où des changements sont désirables. Dans un deuxième temps, il aide à la mise en place des changements nécessaires, principalement en communiquant et en sensibilisant les acteurs à la thématique

concernée puis en favorisant le transfert d'information entre les différentes parties en présence et en apportant son soutien. Il s'agit donc d'une approche de type *facilitateur*.

2.2.1.3 *Apports des systèmes d'information*

Les différents types de coordination proposés par Grant, Seager et al. (2010) s'appuient sur une analyse des systèmes d'information existants utilisés depuis le milieu des années nonante pour faciliter la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles. Le rôle de ces systèmes dépend fortement de leurs caractéristiques et de leurs fonctionnalités. Ce thème est traité en détail dans le Chapitre 3.

Dans tous les cas, la collecte d'informations sur les flux entrants et sortants des entreprises et le suivi de l'évolution des collaborations sont facilités lorsqu'une base de données est disponible pour stocker et traiter les grandes quantités de données inhérentes à ce type de projet. Dès les premiers projets de détection de symbioses industrielles, le recours aux systèmes d'information s'est avéré indispensable. Un historique des outils et de leurs fonctionnalités est proposé dans la Section 3.2.

2.2.1.4 *Objectifs et modalités de la procédure utilisée pour la détection d'opportunités et leur mise en œuvre*

Les rôles, tâches ou fonctions remplis par un coordinateur de projet requièrent tous une connaissance approfondie des ressources matérielles et énergétiques et de leur cheminement dans le système industriel. Il existe trois manières d'acquérir ces données. Premièrement, l'approche empirique consiste essentiellement à réaliser des entretiens orientés avec les acteurs économiques et institutionnels afin de comprendre le territoire et en premier lieu les flux de matière et d'énergie dans leur ensemble. Deuxièmement, l'approche systématique propose une collecte exhaustive de bilans entrant/sortant des activités économiques et une compréhension quantitative de la circulation des ressources sur le territoire. Troisièmement, l'approche déductive cherche à modéliser le fonctionnement d'un territoire à partir de données issues de la littérature spécialisée, sans contact direct avec les entités économiques concernées. Les procédures utilisées pour détecter et analyser les opportunités de symbioses industrielles peuvent faire appel à l'une de ces trois approches, ou constituer une combinaison de deux ou trois d'entre elles.

En 1997, soit la même année que la publication de référence de Ehrenfeld et Gertler sur Kalundborg, Ernest A. Lowe (1997) publie une première procédure dont l'objectif est de faciliter les échanges de co-produits. Dans sa publication, il explique l'importance d'une équipe de projet ayant les capacités de travailler avec les services locaux de développement économique et de protection de l'environnement dans le but de déterminer la valeur potentielle des projets pour la promotion du développement de parcs éco-industriels. Il propose huit étapes allant de la collecte d'information à l'ajustement de la procédure en fonction des succès obtenus :

1. *Analyser les flux entrants et sortants de matières et d'énergie des principales activités économiques sur le périmètre concerné (en incluant des paramètres comme la composition et la nature des flux, la quantité et la disponibilité dans le temps) ;*
2. *Evaluer le potentiel de collecte et de stockage de petites quantités de matériel pour créer un flux répondant au besoin du marché (création de stocks tampon) ;*
3. *Diffuser localement l'information et l'utiliser pour recruter de nouveaux partenaires et pour trouver des opportunités d'échanges avec les entreprises existantes sur le territoire ;*
4. *Déterminer les procédés intermédiaires nécessaires pour remplir les contraintes de qualité ;*
5. *Identifier de nouveaux clients potentiels pour la réutilisation de flux de matière ou d'énergie. Ceux-ci deviennent des candidats pour intégrer le projet ;*
6. *Définir les volumes nécessaires à l'entreprise qui réutilisera le flux ;*
7. *Etudier l'importance relative de l'échange de co-produits par rapport à l'ensemble de la stratégie mise en place ;*
8. *Essayer de recruter les entreprises identifiées préalablement et ajuster la stratégie en fonction des résultats obtenus.* ²⁰

Cette méthodologie, issue des premiers travaux sur le développement de parcs éco-industriels et de symbioses industrielles à large échelle, contient les éléments essentiels qui seront repris dans de nombreux autres projets par la suite : recherche de partenaires, communication, évaluation de la faisabilité technique et dimensionnement du projet.

²⁰ Traduction de l'auteur selon (Lowe 1997) :

The steps include:

1. Analyze the material and energy inputs and outputs of major industries in the area.
 - composition and nature of flows of materials and energy;
 - amounts;
 - distribution of flows in time (steady, periodic, episodic, or irregular);
 - a material and energy quality (consistency over time and purity).
2. Assess the potential of collecting and pooling small quantities of some materials to create flows sufficient to market. (A possible local business development opportunity.)
3. Disseminate information locally and as part of recruitment package and check for matches with existing businesses.
4. Determine material or energy processing required to achieve quality requirements.
5. Identify potential customer industries (as candidates for recruitment) to utilize existing material or energy flows.
6. Define volume requirements of potential customer industries.
7. Establish relative importance of by-product exchange in the overall recruiting strategy.
8. Test recruitment of industries identified. On basis of results, adjust the strategy.

L'Université de Curtin, en Australie a également développé une procédure pour soutenir sa démarche dans la zone industrielle de Kwinana (Bossilkov, van Berkel et al. 2005; van Beers, Corder et al. 2007). Elle est constituée de cinq étapes destinées à mettre en évidence et à évaluer de nouvelles opportunités de symbioses industrielles (Figure 28) :

1. *Planification et organisation : obtention de l'engagement des acteurs économiques ;*
2. *Analyse préliminaire : constitution d'une base de données des flux entrants et sortants et identification des opportunités ;*
3. *Etablissement d'un ordre de priorité des solutions détectées en fonction de critères de réalisabilité et de pertinence environnementale ;*
4. *Analyse de faisabilité technique, économique, environnementale et sociale ;*
5. *Réalisation et suivi.*

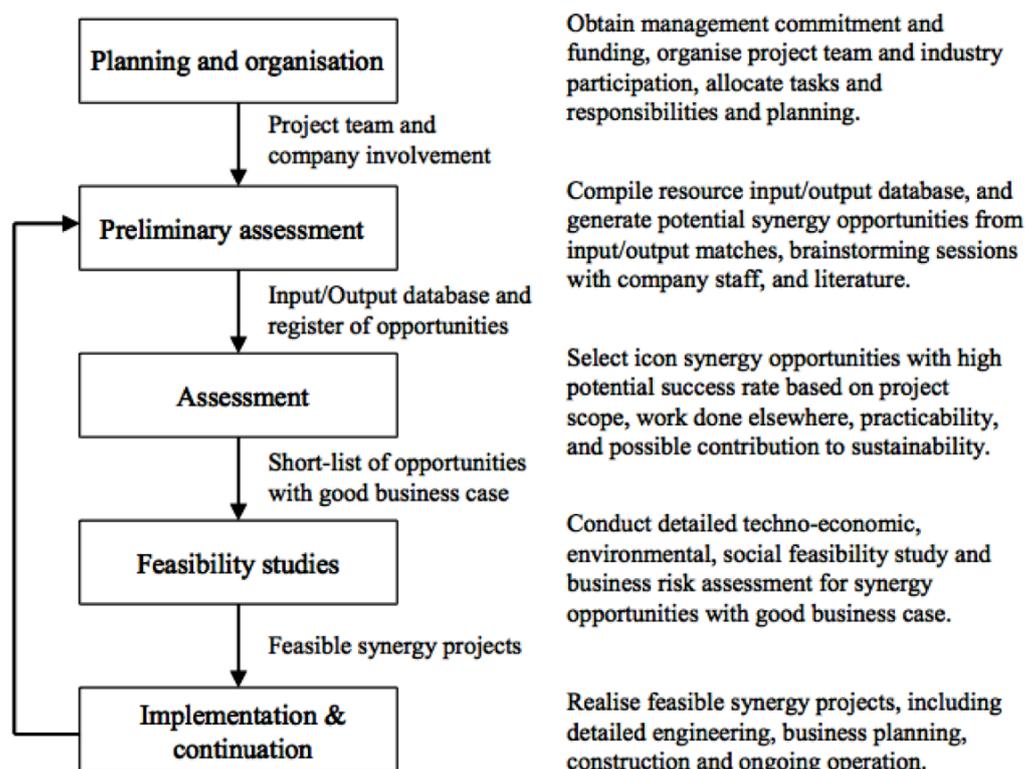


Figure 28 : Méthodologie pour l'identification et l'évaluation de nouvelles synergies régionales à Kwinana.

Source : (van Beers, Bossilkov et al. 2005).

Cyril Adoue (2007) propose également une méthode en quatre étapes pour mettre en place une démarche de développement éco-industriel. Elle concerne en fait la détection et l'évaluation de symbioses industrielles grâce à l'outil de gestion de base de données Presteo. Il s'agit de la procédure appliquée

dans le cas du canton de Genève en 2004 et 2005 et qui sert de référence pour les développements présentés dans la suite du chapitre :

1. *Identification des acteurs clés, institutionnels et industriels ;*
2. *Elaboration d'une stratégie de communication ;*
3. *Etude de potentiel de Système en échantillonnant 15 à 20 PME, en analysant leurs flux entrants et sortants, en formatant les données dans Presteo et en recherchant les synergies potentielles ;*
4. *Pérenniser et développer la démarche en organisant le réseau créé, en formant un animateur de terrain et en valorisant la démarche à l'extérieur du territoire considéré.*

En conclusion, plusieurs procédures ont été développées et appliquées dans différentes régions du globe dans un même but : mettre en œuvre des symbioses industrielles. Les trois exemples détaillés ci-dessous contiennent un certain nombre d'éléments récurrents : la collecte d'informations sur les flux de matière et d'énergie, la détection de symbioses industrielles potentielles, leur évaluation et la mise en place d'une stratégie de communication pour faciliter leur mise en œuvre et acquérir de nouveaux partenaires.

2.2.2 Paramètres techniques influençant la faisabilité et la pertinence d'une symbiose industrielle

La nécessité de connaître les flux de matière et d'énergie utilisés par les activités économiques est un élément récurrent des procédures destinées à faciliter la création de symbioses industrielles. Ernest A. Lowe (1997) décrit également la nécessité d'évaluer plusieurs paramètres techniques : la quantité, la qualité et la disponibilité dans le temps. La thèse de Cyril Adoue (2004) reprend les paramètres énoncés par Lowe et y ajoute l'analyse de la faisabilité légale, de la faisabilité économique, ainsi qu'un facteur de faisabilité culturelle. Il aborde également la faisabilité environnementale et l'éco-efficacité d'une synergie. La méthodologie développée par l'Université de Curtin utilise les mêmes paramètres pour aboutir à la détection d'une liste restreinte d'opportunités réalisables (van Beers 2006).

Plusieurs auteurs ont enrichi cette liste de critères techniques définissant la faisabilité et la pertinence d'une symbiose industrielle (Korhonen, Okkonen et al. 2004; Chertow et Lombardi 2005; Jacobsen 2006; Phillips, Barnes et al. 2006; Adoue 2007; Geng, Zhang et al. 2009). Outre les facteurs sociaux et territoriaux détaillés dans la Section 2.2.1, les paramètres qui reviennent constamment dans la littérature sont d'ordre technique, légal, économique et environnemental. Une entreprise, un groupe d'entreprises ou une administration publique souhaitant mettre en œuvre des symbioses industrielles doivent posséder une connaissance approfondie de ces éléments. Ces quatre dimensions influencent la faisabilité globale d'une solution (Figure 29).

Attardons-nous sur la pertinence d'une symbiose industrielle et son effet sur l'ensemble du système industriel. Les effets d'une action dans le domaine environnemental peuvent se manifester de deux manières : directe ou indirecte. Les effets directs se produisent à l'intérieur du système considéré, comme une filière de valorisation ou un espace géographique défini. Par exemple, dans le domaine de la gestion des déchets, si la quantité de déchets mis en décharge diminue sous l'effet d'une action, l'effet sur la filière concernée est qualifié de direct. Les effets indirects regroupent les effets de la même action, mais se produisant à l'extérieur du système, soit de la filière ou du territoire considéré. Par exemple, un flux de déchet utilisé pour la production d'énergie à destination de logement, en substitution à la consommation de combustibles fossiles, a un effet sur plusieurs pans de la société comme le secteur des transports ou l'économie de la région extractrice de la ressource, et pas seulement dans le système de management des déchets (Korhonen, Okkonen et al. 2004). De la même manière, l'évaluation de l'effet d'une symbiose industrielle sur un territoire peut donc se faire de manière directe et indirecte. L'effet direct est représenté par la réduction des impacts sur l'environnement et la plus-value économique réalisée par les acteurs économiques sur le territoire considéré. L'effet indirect concerne l'effet d'une synergie sur l'ensemble du système économique et sociétal du territoire considéré, impliquant la mise en place d'un référentiel de durabilité traitant de manière équilibrée les trois piliers du développement durable. Qualifier et quantifier la performance économique, qui indirectement influence les aspects sociaux, et environnementaux d'un territoire n'est pas une tâche aisée. Quantifier l'éco-efficacité d'un territoire implique de relier les aspects environnementaux et économiques dans une même équation. Les résultats varient fortement en fonction des indicateurs d'impacts environnementaux (Seppälä, Melanen et al. 2005). L'analyse de la performance environnementale et de l'éco-efficacité d'un territoire est une discipline qui va être amenée à se développer dans les prochaines années. Les indicateurs de comptabilité physique permettant de mettre en relation la consommation de ressources et, par exemple, le produit intérieur brut d'un territoire, sont en plein développement. Leur essor au niveau européen et leur introduction dans les procédures de l'Office Européen de la Statistique (Eurostat) implique qu'il faudra y porter une attention particulière ces prochaines années (Bringezu 2009).

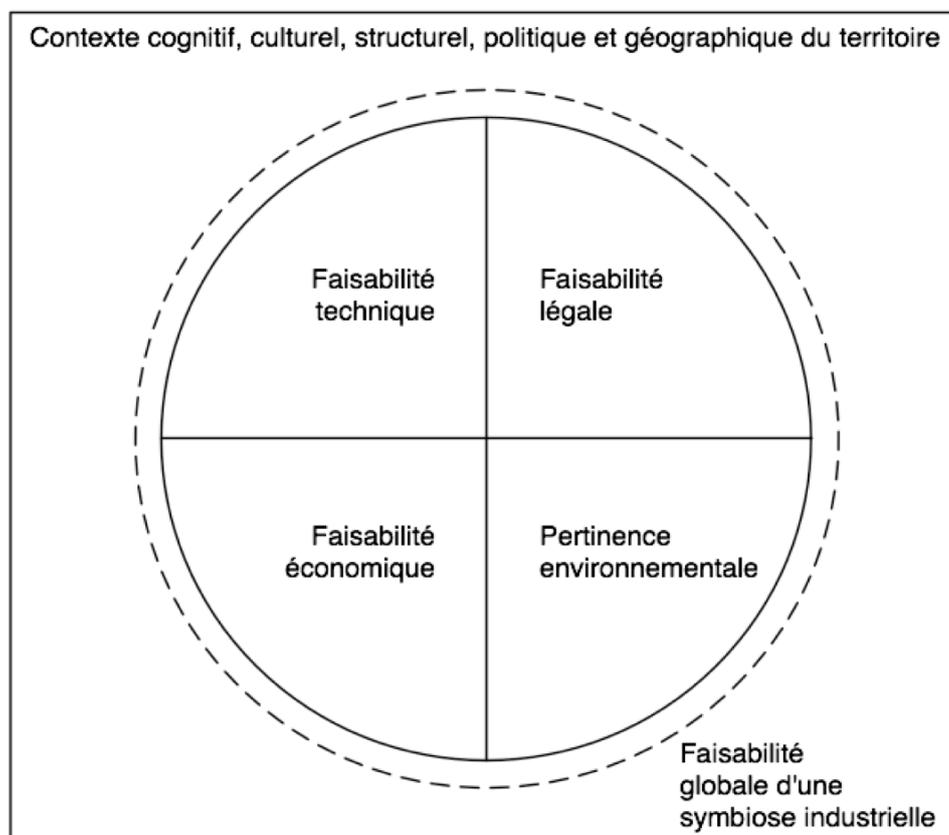


Figure 29 : Paramètres de faisabilité et de pertinence des symbioses industrielles. Source : auteur.

Les symbioses industrielles impliquent souvent des changements au sein des filières d'extraction, de transport, d'utilisation et de fin de vie d'une ressource. En plus de permettre, dans la plupart des cas, une diminution des impacts environnementaux, elles représentent également une manière d'améliorer la performance économique d'un territoire en rendant les entreprises moins dépendantes des importations et des marchés internationaux et en diminuant la quantité de ressources consommées par produit manufacturé.

Le présent travail se restreint à la mise en place d'un référentiel de faisabilité des synergies destiné à décrire leurs effets directs. Nous verrons plus loin que l'analyse de la pertinence environnementale, basée sur une approche de type cycle de vie inclut leurs effets directs et indirects (Section 2.4.4).

2.3 METHODOLOGIE D'AUDIT DES ACTIVITES ECONOMIQUES

Il existe de nombreux outils, développés au cours des dernières décennies, destinés à évaluer et à améliorer la performance environnementale des entreprises. Une publication de van Berkel, Willems et al. (1997) propose un cadre pour comparer les méthodes d'analyse et d'évaluation utilisée pour la mise en œuvre de l'écologie industrielle à l'échelle de l'entreprise. Ils écrivent alors :

Les outils sont destinés à soutenir les entreprises pour organiser leurs efforts dans le domaine de l'écologie industrielle, pour identifier, évaluer et mettre en œuvre des améliorations environnementales pour leurs produits, leurs procédés et leurs chaînes de production et de mesurer les progrès réalisés par la diminution des impacts environnementaux. ²¹

Les outils sont classés en quatre catégories relatives à leur fonction : outils d'inventaire, d'amélioration, de définition des priorités et de management.

Les outils d'inventaire développés par le monde académique et le secteur privé sont nombreux. Dans le domaine de l'écologie industrielle, ils se concentrent sur les flux de matière et d'énergie liés au cycle de vie d'un produit ou d'un procédé. Les méthodologies appliquées aux produits sont l'inventaire de cycle de vie (Life Cycle Inventory – LCI) et la MET, pour Materials, Energy and Toxic emissions matrix. En ce qui concerne les procédés, nous trouvons le bilan environnemental, le bilan de matières et le diagramme des flux (van Berkel, Willems et al. 1997).

De prime abord, les outils intéressants dans le domaine des symbioses industrielles sont le bilan de matières et d'énergie, ainsi que le diagramme des flux. Le bilan de matières et d'énergie est utilisé pour quantifier l'ensemble des flux physique de matières et d'énergie à l'échelle d'un processus de production ou d'une unité de production. Elle permet de comprendre la circulation des flux de matière au sein des chaînes de production de l'entité économique. Sa réalisation suit les mêmes règles que l'analyse physique des flux de matière, qui demande un équilibre entre flux entrants, flux sortants et stocks. Elle est appelée physique afin d'être différenciée de la méthodologie dont elle est elle-même issue, l'analyse entrant – sortant des flux financiers. Les flux identifiés sont ensuite souvent représentés sous forme de diagramme des flux pour chacune des unités étudiées. Appliquée à la stratégie environnementale d'entreprise, cette méthodologie contribue à identifier les principales sources de déchets et les procédés consommant de grandes quantités d'énergie (van Berkel, Willems et al. 1997; Brunner et Rechberger 2004).

²¹ Traduction de l'auteur selon (van Berkel, Willems et al. 1997) :

The tools are to enable enterprises to organise their IE efforts, to identify, evaluate and implement environmental improvements in their processes and products as well as in the production chains and industrial sites they are part of, and to evaluate progress in reducing environmental impacts.

Les symbioses industrielles constituent une option pour l'optimisation de l'usage des ressources à l'échelle inter-entreprises ou plus généralement à l'échelle d'un territoire (Chapitre 1). Dans ce contexte élargi de la consommation de ressources des entreprises, le recours à l'inventaire de cycle de vie permet de mieux comprendre l'origine et le devenir d'un flux de matière ou d'énergie. La production d'un bien est alors organisée sous la forme d'arbres de procédés. Les flux de matière et d'énergie, ainsi que les émissions et déchets générés par chaque procédé de l'arbre doivent être décrits. Il en résulte une image de l'ensemble de la consommation de ressource et des émissions liées au cycle de vie d'un produit (van Berkel, Willems et al. 1997; Jolliet, Saadé et al. 2005).

La Figure 30 propose une représentation schématique des éléments du système industrielle qu'il est important de décrire et de quantifier pour détecter et évaluer une symbiose industrielle. Elle combine le bilan de flux de matière et d'énergie et l'inventaire de cycle de vie.

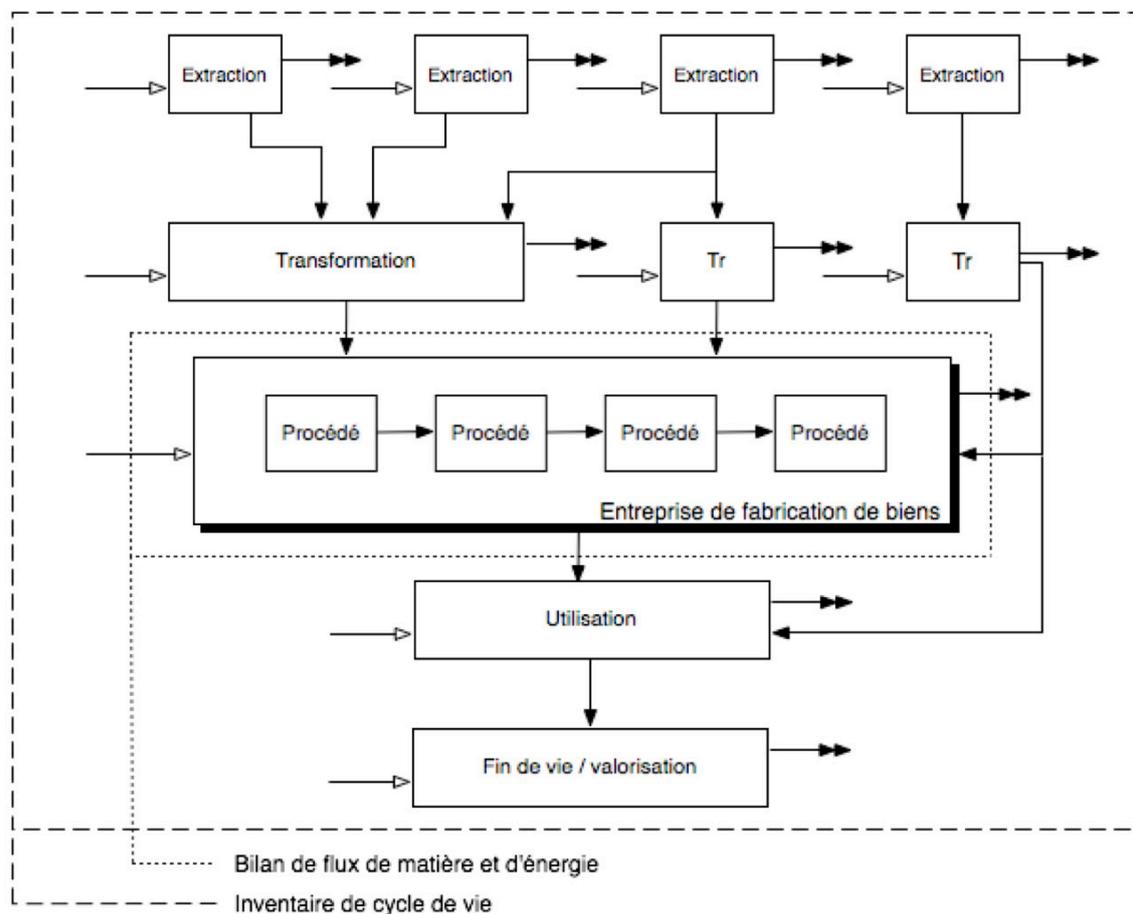


Figure 30 : Représentation schématique du système industriel combinant le bilan de flux de matière et d'énergie et l'inventaire de cycle de vie. Source : adapté de (van Berkel, Willems et al. 1997)

Les premières informations nécessaires pour détecter des opportunités de symbioses industrielles concernent les flux de matière et d'énergie utilisés par une activité économique. Un coordinateur de projet

doit pouvoir connaître ces informations pour plusieurs raisons. Premièrement, les flux de matière utilisés varient fortement d'une entité économique à l'autre, même au sein d'un secteur d'activité précis. La collecte systématique d'informations sur les flux entrants et sortants permet de s'assurer que certains flux sont bien présents et d'obtenir des informations supplémentaires pour l'analyse de faisabilité. Elle permet également d'évaluer l'efficacité des procédés consommant le flux et ainsi de déterminer si une symbiose industrielle est adéquate par rapport à d'autres outils d'optimisation. Deuxièmement, la visite de la chaîne de production permet d'établir un contact avec les responsables à différents niveaux, ce qui favorise l'établissement d'un lieu de confiance. Les visites ont ainsi un rôle de sensibilisation et permettent d'évaluer le degré d'intégration des préoccupations environnementales dans les processus de décision de l'entreprise.

En effectuant une recherche bibliographique, nous avons remarqué qu'aucune méthodologie d'audit décrite dans la littérature n'était vraiment adaptée à la problématique des symbioses industrielles. Les groupes de recherche ayant développés des procédures de détection et de mise en œuvre n'ont pas publié ces éléments. Seuls van Beers (2006) et Adoue (2007) décrivent partiellement la méthodologie de collecte des données. Ainsi, nous proposons dans cette section une nouvelle méthodologie se basant sur le bilan de matières et d'énergie et sur l'inventaire de cycle de vie (Figure 30). Elle se base sur les premiers travaux de Adoue (2004) et sur nos expériences acquises lors des études de cas de Genève et Lausanne Région. Le recours à l'inventaire de cycle vie est justifiée par le besoin de disposer des informations sur la nature, l'origine, l'utilisation et le devenir des flux une fois qu'ils quittent les limites de l'entreprise et ce en particulier afin d'évaluer la pertinence de la solution proposée.

Pour pouvoir mener un audit destiné à détecter des symbioses industrielles, le premier enjeu consiste en la création d'une nomenclature des flux de matière et d'énergie adaptée. Ainsi, une nomenclature des flux est proposée dans la Section 2.3.1. Le deuxième consiste à déterminer les paramètres qu'il est nécessaire de collecter pour optimiser les chances de détecter des opportunités intéressantes et faciliter leur évaluation. Une proposition développée dans le contexte suisse est détaillée dans la Section 2.3.2. Suite à cela, les paramètres influençant la faisabilité et la pertinence des symbioses industrielles détectées sont discutés en fonction de critères technique, légal, économiques et environnemental (Section 2.4).

2.3.1 Nomenclature des flux de matière et d'énergie

Étonnamment, il ne semble pas exister de nomenclatures des flux adaptées au suivi du cheminement d'une ressource dans le système industriel, et donc aux symbioses industrielles. Aucune de celles disponibles en Suisse ne semble proposer une terminologie cohérente, exhaustive et fermée entre flux entrants et sortants. Or, la recherche de synergies et le suivi d'un flux de matière supposent que l'on puisse identifier facilement celui-ci à toutes les étapes de son cycle de vie. A titre d'exemple, la seule nomenclature qui semble être disponible en Suisse concerne les déchets spéciaux. Or, les qualificatifs

donnés aux déchets (flux sortants) ne sont pas comparables à ceux utilisés pour décrire les matières premières. Le recours à une nomenclature fermée, ce qui signifie qu'elle permet de décrire l'ensemble des flux du système considéré, s'explique de la manière suivante. Par exemple, une brique neuve décrite par ces caractéristiques techniques devient un déchet inerte en fin de vie et une pièce métallique de forme spécifique devient un déchet d'acier mélangé.

Premièrement, une nomenclature adaptée doit permettre de soutenir la démarche d'audit elle-même en fournissant au coordinateur ou simplement à un auditeur un vocabulaire reflétant la réalité. Deuxièmement, il permet de faciliter la détection de symbioses industrielles à partir de la comparaison des bilans de flux obtenus pour plusieurs activités économiques en assurant une compatibilité des données entre flux entrants et sortants, ainsi qu'entre entreprises. L'enjeu est important : établir un langage commun à l'ensemble des acteurs économiques et aux intermédiaires de la gestion des déchets.

Tableau 3 : 18 familles de flux constituant la nomenclature fermée des flux de matière et d'énergie utilisée pour l'audit d'entreprises en vue de la détection de symbioses industrielles. Source : auteur.

N°	Famille de flux	Exemples de flux
1	Bois	Bois naturel, bois brut, bois traité
2	Boues	Boue d'épuration, boue de curage
3	Cellulose	Carton, papier, bagasse
4	Eau	Eau déminéralisée, eau souterraine, eau traitée,
5	Encres et pigments	Pigment, encre, peinture, teinture
6	Gaz	Ammoniac, azote, hydrogène, oxygène
7	Huiles et graisses	Huile minérale, huile végétale, graisse
8	Macromolécules	Enzyme, protéine
9	Matériaux inertes	Sable, gravier, argile cuite, brique, tuile, verre
10	Matériaux électroniques et informatiques	Câble électrique, ordinateur
11	Matières organiques	Matière organique végétale et animale
12	Métaux	Métal pur, composé métalliques
13	Objets et substances fonctionnels	Adhésif, bouteille, chiffon, emballage, palette
14	Organismes vivants	Algue, bactérie, bétail, poisson
15	Plastiques et caoutchoucs	Blanchet d'imprimerie, résine plastique
16	Produits chimiques	Solvant, acide, base
17	Textiles et cuirs	Fibre animale, fibre synthétique
18	Vecteurs énergétiques	Air chaud, biogaz, charbon, électricité, vapeur

La nomenclature utilisée pour cette recherche se base sur les travaux réalisés par Cyril Adoue en 2004 et 2005 et repris ensuite par le groupe de travail Ecosite du canton de Genève entre 2006 et 2009 (Adoue 2005; Massard 2008). Au cours de cette deuxième phase, la nomenclature a été modifiée à l'Université de Lausanne afin d'être adaptée au contexte suisse et à nos recherches. Initialement, elle se composait de deux niveaux de description, permettant une caractérisation précise de chaque *flux* et lorsque cela était nécessaire, de chacun de ses *composants* (Adoue 2004). Adoue avait en 2004 déjà mis en évidence certaines limites de cette approche. Il suggérait entre autres de travailler sur la fonction d'un flux et non sur son nom car plusieurs flux ou composants différents peuvent remplir une même fonction dans un procédé. Nous reviendrons sur ce point dans le Chapitre 3, Section 3.3.2.

L'objectif de cette section est de déterminer comment une nomenclature cohérente peut accompagner au mieux les tâches du coordinateur de terrain. Pour faciliter son travail et lui permettre de s'y retrouver dans les grandes quantités de données inhérentes à la problématique des symbioses industrielles, un troisième niveau de description a été ajouté à la première nomenclature développée par Adoue. Il s'agit du niveau de la *famille de flux*, regroupant les noms de flux par thématique. Nous avons défini 18 familles de flux afin de faciliter les recherches dans la nomenclature, la détection de symbioses industrielles et la classification des pistes potentielles une fois qu'elles ont été détectées. Le chiffre 18 est un choix établi sur la base de l'expérience acquise sur le terrain, l'objectif étant de distinguer des grandes thématiques afin de rendre les interactions avec les entreprises plus claires. L'introduction de ce nouveau niveau a également permis de fermer la nomenclature, tout flux devant obligatoirement être assigné à une des familles listées dans le Tableau 3. Ainsi, les flux de matière et d'énergie circulant au sein du système industriel sont classifiés dans une nomenclature à trois niveaux qui permet au coordinateur de distinguer 18 thématiques et, le cas échéant, de faire appel à des expert spécialisés dans chaque domaine pour étudier les solutions proposées et ainsi augmenter les chances de réalisation.

Dans une situation idéale, la nomenclature en trois niveaux devrait permettre de caractériser l'ensemble de l'activité industrielle à l'échelle mondiale. Tous les flux des entreprises, quels que soient leurs secteurs économiques ou leurs lieux d'implantation devraient entrer dans un tel système de classification. Atteindre un degré élevé de cohérence reste néanmoins un objectif lointain. La nomenclature proposée dans ce travail a été élaborée en se basant sur les principes suivants :

- Permettre une classification relativement large, c'est à dire comprenant un grand nombre de flux. De cette manière, une majeure partie des flux rencontrés correspondraient à une entrée de la liste ;
- Veiller cependant à ne pas définir d'entrées trop larges. Il en résulterait une dégradation de la pertinence des détections de synergies en augmentant le nombre de fausses pistes ;
- Offrir également la possibilité d'être très précis dans la classification. Si l'information détaillée concernant un flux est connue, il faut pouvoir l'intégrer ;

- Eviter des redondances qui pourraient apparaître si deux entrées ou sorties différentes pour un même flux sont possibles ;
- Privilégier l'aspect fonctionnel de la nomenclature à une classification scientifique rigoureuse. Les flux les plus couramment rencontrés peuvent être assignés à une entrée.
-

Ces considérations sont reprises dans le Chapitre 3. Un test de la robustesse de la nomenclature utilisée a été réalisé sur la base de données collectées pour le projet pilote de Genève dans la Section 3.3.2.

2.3.2 Données collectées au cours de l'audit

2.3.2.1 Données générales sur l'entreprise

L'objectif du coordinateur, lorsqu'il établit les premiers contacts avec une entreprise, consiste à établir le dialogue avec ses interlocuteurs en expliquant les motivations du projet et brièvement les principaux avantages liés à l'optimisation des ressources. La rencontre entre le coordinateur et l'entreprise constitue le point de départ de la relation de confiance qui doit s'établir. Pour cela, il doit s'appuyer sur ses connaissances du contexte culturel, structurel et politique du territoire. En particulier, une connaissance approfondie du contexte législatif et des politiques publiques permet de mettre les acteurs économiques en confiance. Le coordinateur représente alors une valeur ajoutée de par les informations qu'il apporte lors des premiers contacts avec les responsables de l'entreprise. Cependant, l'objectif du coordinateur est d'amener ses interlocuteurs à s'exprimer sur les problèmes rencontrés dans le domaine de la gestion des ressources. Il a intérêt à les faire parler de leur stratégie environnementale et des actions en cours, ainsi qu'à collecter des informations d'ordre général sur la structure de l'entreprise avant d'entreprendre l'audit à proprement parler.

A ce stade, les informations réunies sont surtout utiles pour identifier d'autres interlocuteurs éventuels et pour prendre connaissance de l'historique de l'entreprise dans le domaine de l'environnement et de l'efficacité de son utilisation des ressources. Il convient en particulier de déterminer si l'entreprise possède un système de management environnemental, qui représente une source de données importante permettant de gagner du temps, et si l'entreprise possède des certifications de type ISO et EMAS. Finalement, les contraintes légales et les dispositions réglementaires spécifiques à l'activité considérée sont également analysées. Elles vont définir la marge de manœuvre interne à l'entreprise pour la mise en place de symbioses industrielles. Les champs du questionnaire sont détaillés dans le Tableau 4 sous forme de catégories et de thématiques abordées.

Tableau 4 : Catégories et sous-catégories d'informations collectées lors de l'audit d'une entreprise.
Source : auteur.

Catégorie	Thématiques abordées
Informations générales	<p><i>Adresse, contact et coordonnées géographiques des unités locales située sur le territoire</i></p> <p><i>Coordonnées des personnes de contact, incluant le/les responsables qualité, sécurité et environnement (QSE)</i></p> <p><i>Description détaillée des activités principales et secondaires</i></p> <p><i>Production annuelle, type de produits et quantités</i></p> <p><i>Dispositions légales spécifiques à l'activité</i></p> <p><i>Implication de l'entreprise dans des associations de branche ou du territoire (association de zone industrielle, chambre de commerce, ...)</i></p>
Politique environnementale	<p><i>Existence d'un système de management environnemental, date de création, objectifs, réalisation</i></p> <p><i>Existence de certification (ISO, EMAS, ...), objectifs, personne responsable</i></p> <p><i>Réalisation d'audit spécifique (énergie, gestion des déchets) et d'étude d'optimisation de procédé ou d'ACV</i></p> <p><i>Autres objectifs / démarche en lien avec le développement durable et la gestion des ressources</i></p> <p><i>Nombre et types de contrats passés avec des collecteurs et des recycleurs de déchets</i></p> <p><i>Existence de collaboration ou de symbioses industrielles avec d'autres entités économiques</i></p>

2.3.2.2 *Données spécifiques sur les flux de matière et l'énergie*

Le deuxième objectif de l'auditeur est de visiter les chaînes de production et d'éplucher la documentation identifiée lors de la première partie de la rencontre afin de réaliser un bilan de matières et d'énergie de l'unité de production. Cette tâche peut se dérouler en même temps que la collecte des informations générales ou dans un deuxième temps. Le coordinateur cherche alors à identifier de manière systématique les flux entrants et sortants de chaque procédé. Ce travail aboutit à l'établissement d'un diagramme des flux incluant les niveaux suivants : procédé, chaîne de production et éventuellement unité locale si une entreprise dispose de plusieurs sites de production sur le territoire défini pour le projet (voir description des entités économiques en Suisse, Section 1.6.1.1).

La collecte des données respecte la nomenclature en trois niveaux détaillée précédemment dans la Section 2.3.1. La méthodologie du bilan de matières et d'énergie permet d'identifier les flux et leurs

composants et de les quantifier. Néanmoins, cela n'est pas suffisant pour évaluer la faisabilité d'une opportunité de symbiose industrielle et pour comprendre l'organisation logistique interne de l'entreprise. Dans le but d'enrichir la collecte de donnée et d'élargir le champ d'investigation, nous avons développé un formulaire contenant 26 champs qui permettent de caractériser de manière détaillée l'utilisation et le cheminement d'un flux au sein d'une entreprise. Leur analyse permettra de déterminer si une symbiose potentielle est réalisable et pertinente selon les quatre paramètres technique, légal, économique et environnemental énoncés à la Section 2.2.2. Ce formulaire est basé sur les premiers travaux réalisés par Cyril Adoue à Genève (Adoue 2005). Par la suite, nous l'avons repensé en nous appuyant sur les travaux de terrain réalisés par l'intermédiaire du bureau de conseil SOFIES Sàrl à Genève et dans les cantons de Vaud et du Valais (Massard 2008). Avant d'aller plus avant dans la description et la justification de ces paramètres, il est important de souligner que le coordinateur ne parviendra pratiquement jamais à obtenir des informations pour l'ensemble des champs. Il devra faire appel à son expérience pour déterminer les champs les plus importants en fonction du flux considéré, de la situation de l'entreprise et de son savoir faire dans le domaine des synergies.

Le formulaire est organisé en quatre phases reprenant le concept de l'inventaire de cycle de vie (Figure 31). Le rôle du flux dans l'activité considérée est d'abord décrit en détaillant la situation du procédé au sein de la chaîne de production de l'unité locale. La situation détaille la division ou la chaîne de production concernée dans l'entreprise, le procédé dans lequel il est utilisé, sa fonction dans le procédé, la puissance du procédé (en particulier pour la problématique énergétique) et s'il s'agit d'un flux entrant ou sortant. Il est ensuite caractérisé selon la nomenclature détaillée dans la section précédente. Le nom de flux utilisé par l'entreprise et la formule chimique sont également inscrit dans le questionnaire. Il s'agit ensuite de collecter des données techniques spécifiques au procédé et à l'utilisation du flux : quantité, unité, disponibilité (fluctuation) dans le temps, température, concentration, pression, pH, état, forme et potentiel énergétique. Ces éléments serviront à évaluer la faisabilité technique d'une synergie. Ils pourront également être utilisés par un expert pour suggérer des solutions d'optimisation interne à l'entreprise qui permettrait de réduire ou de supprimer l'utilisation du flux considéré.

Ces éléments ne suffisent cependant pas à avoir une vision d'ensemble de l'utilisation d'un flux ni d'évaluer la faisabilité économique et la réduction potentielle des impacts environnementaux. Les deux catégories suivantes concernent l'organisation logistique, les coûts de l'approvisionnement, ainsi que l'organisation et les coûts des filières de valorisation (Figure 31). Les données logistiques et financières considérées pour l'approvisionnement sont les coûts d'approvisionnement, le lieu (et le nom) d'origine (position géographique), la distance parcourue et le moyen de transport utilisé. La même réflexion est menée en ce qui concerne les filières de valorisation. Les champs que nous souhaitons renseigner sont les coûts liés à la collecte et au traitement, le nom de l'entité de recyclage, la classification du type de valorisation dans la hiérarchie des déchets, la technologie de valorisation, le lieu de valorisation, la distance parcourue avant d'aboutir à une valorisation et le moyen de transport utilisé. Finalement, les

derniers champs permettent ensuite à l'auditeur d'estimer le potentiel de substitution ou de mutualisation et d'indiquer la source exacte des données, leur fiabilité et la date de collecte.

Tous ces éléments sont définis dans le Tableau 5. Leur intégration dans le processus d'analyse de faisabilité est détaillée à la Section 2.4. Ces champs peuvent être dupliqués pour caractériser les différents composants d'un flux. Les mélanges de flux, la présence d'impuretés ou de traces d'éléments chimiques est donc indiquée en décrivant ces caractéristiques de la même manière que le flux dont ils font partie.

La Figure 31, qui propose une représentation schématique des éléments mentionnés dans les paragraphes précédents, mentionne également la nature de l'environnement géographique de l'entreprise. La prise en compte des ressources, entités économiques et infrastructures présentes dans le voisinage de l'entreprise permet à l'auditeur de considérer dans ses réflexions des installations auxquelles l'entreprise pourrait se raccorder, ainsi que les ressources renouvelables endogènes disponibles ²².

2.3.2.3 *La confidentialité des données*

La confiance entre acteurs économiques et la nécessité d'échanger des informations pour mettre en œuvre des symbioses industrielles sont des considérations récurrentes dans cette recherche. La méthodologie d'audit des activités économiques proposée dans cette section implique d'obtenir de grandes quantités d'information auprès de chaque entreprise et de pouvoir ensuite en communiquer tout ou partie à d'autres acteurs économiques. Dans les procédures de détection de symbioses industrielles détaillées dans les sections suivantes, la question de la confidentialité est une préoccupation centrale.

La méthodologie d'audit prévoit la signature d'un accord de confidentialité lorsque l'entreprise le demande. Dans ce cas, le coordinateur de projet et l'auditeur doivent spécifiquement demander l'autorisation de divulguer des informations à des tiers. Lorsque les activités concernées sont sensibles, comme dans le cas des industries chimiques et pharmaceutiques ou d'activité à forte valeur ajoutée, l'audit peut se restreindre aux procédés et aux flux de matière et d'énergie qui ne sont pas directement concernés par le secret industriel. A titre d'exemple, la plupart des entreprises fabriquant des substances actives pour des médicaments consomment de l'eau, de l'énergie et utilisent de grandes quantités de vapeur.

La confidentialité a donc attiré au mécanisme structurel qui traite des relations entre individus ou organisations. Dans le contexte des symbioses industrielles, des relations de confiance augmentent les chances de réussite d'un projet. Si les contraintes de confidentialité sont trop importantes ou si les relations entre individus sont mauvaises, le coordinateur ou l'auditeur ne pourra pas faire son travail dans de bonnes conditions et la réussite du projet s'en ressentira.

²² Pour l'aider dans ce travail, il dispose de l'outil d'aide à la décision SymbioGIS présenté dans le Chapitre 3.

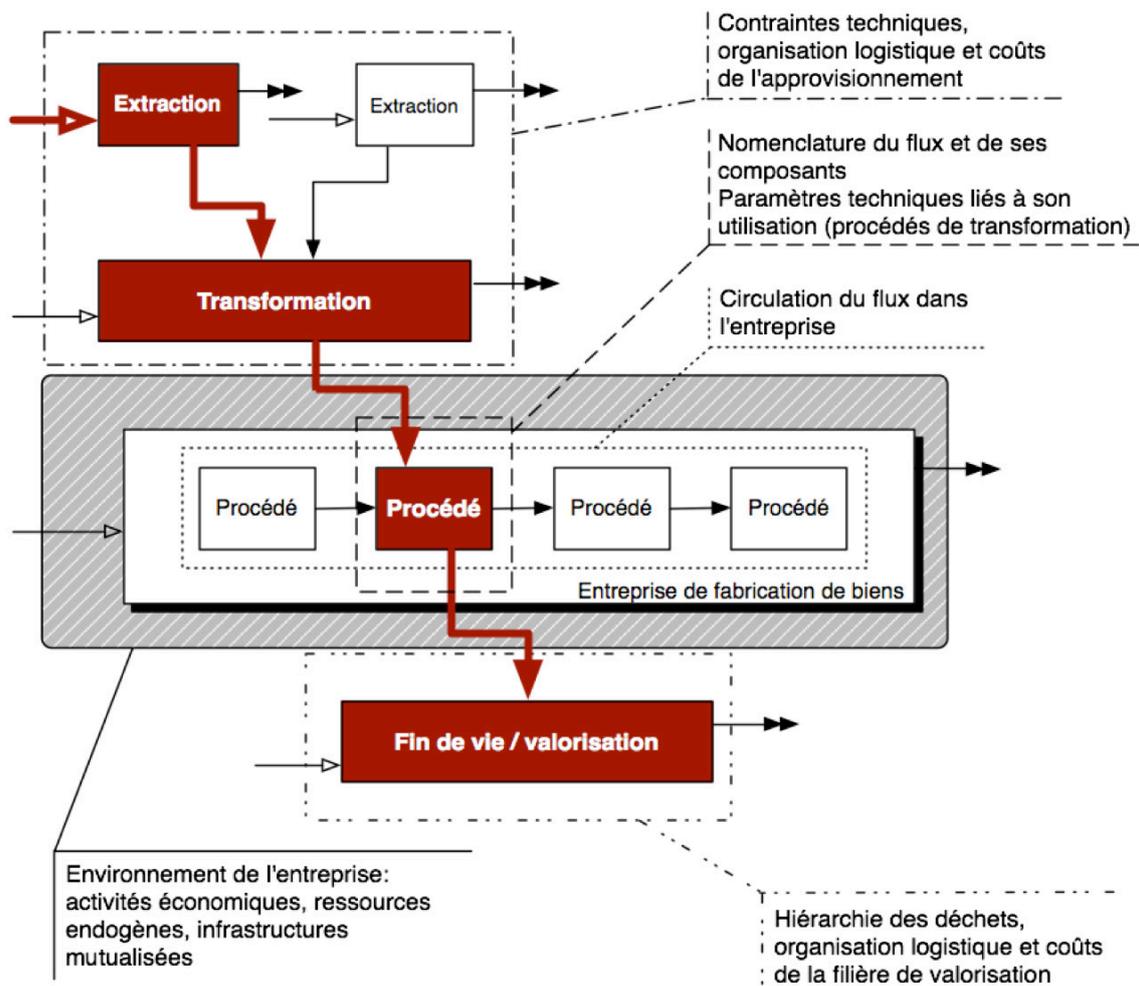


Figure 31 : Cycle de vie d'un flux de matière utilisé par une entité économique et identification des informations utiles pour la détection et l'évaluation des symbioses industrielles dans le cas d'une entreprise du secteur secondaire. Source : auteur.

Tableau 5 : Paramètres recensés concernant les flux de matière et d'énergie lors d'un audit d'entreprise.

Source : auteur, inspiré de (Adoue 2004).

Catégories	Sous-catégories
Situation dans l'unité locale	<i>Division / chaîne de production</i> <i>Procédé</i> <i>Fonction</i> <i>Puissance (procédé)</i> <i>E/S (entrant ou sortant)</i>
Nomenclature	<i>Famille de flux</i> <i>Nom du flux</i> <i>Composants du flux</i> <i>Nom du flux tel que communiqué par l'entreprise</i> <i>Formule chimique</i>
Paramètres techniques	<i>Quantité</i> <i>Unité (pour le champ quantité)</i> <i>Disponibilité (fluctuation) dans le temps</i> <i>Température (°C)</i> <i>Concentration (%)</i> <i>Pression (bar)</i> <i>pH</i> <i>Etat (l, g, s)</i> <i>Forme /qualité (pour l'eau par ex.)</i> <i>Potentiel énergétique ou exergétique (éq kWh)</i>
Approvisionnement	<i>Coût d'approvisionnement (CHF)</i> <i>Lieu d'approvisionnement ou d'origine de la ressource</i> <i>Distance parcourue (kilomètre)</i> <i>Moyen de transport utilisé</i>
Filière de valorisation	<i>Coûts de traitement (CHF)</i> <i>Entité de recyclage / réutilisation</i> <i>Hierarchie des déchets</i> <i>Technologie de valorisation</i> <i>Lieu de valorisation</i> <i>Distance parcourue (km)</i> <i>Moyen de transport utilisé</i>
Commentaires	<i>Potentiel de substitution</i> <i>Commentaires additionnels</i>
Données	<i>Source des données</i> <i>Fiabilité des données</i> <i>Date de collecte de l'information</i>

2.4 ANALYSE DE FAISABILITE ET DE PERTINENCE

L'objectif de cette section est de discuter les paramètres influençant la faisabilité d'une solution et son potentiel à réduire les impacts des activités économiques sur l'environnement. Elle est donc dédiée à la description des quatre paramètres de faisabilité technique, légale, économique et de pertinence environnementale, exposés dans la Section 2.2.2, ainsi qu'à une discussion de la faisabilité globale d'une symbiose industrielle. La Figure 32 reprend les éléments présentés à la Figure 29 (page 106) en mentionnant l'existence d'*éléments éliminatoires*. En effet, un seul des critères composant un paramètre suffit dans certains cas pour empêcher la concrétisation d'un projet.

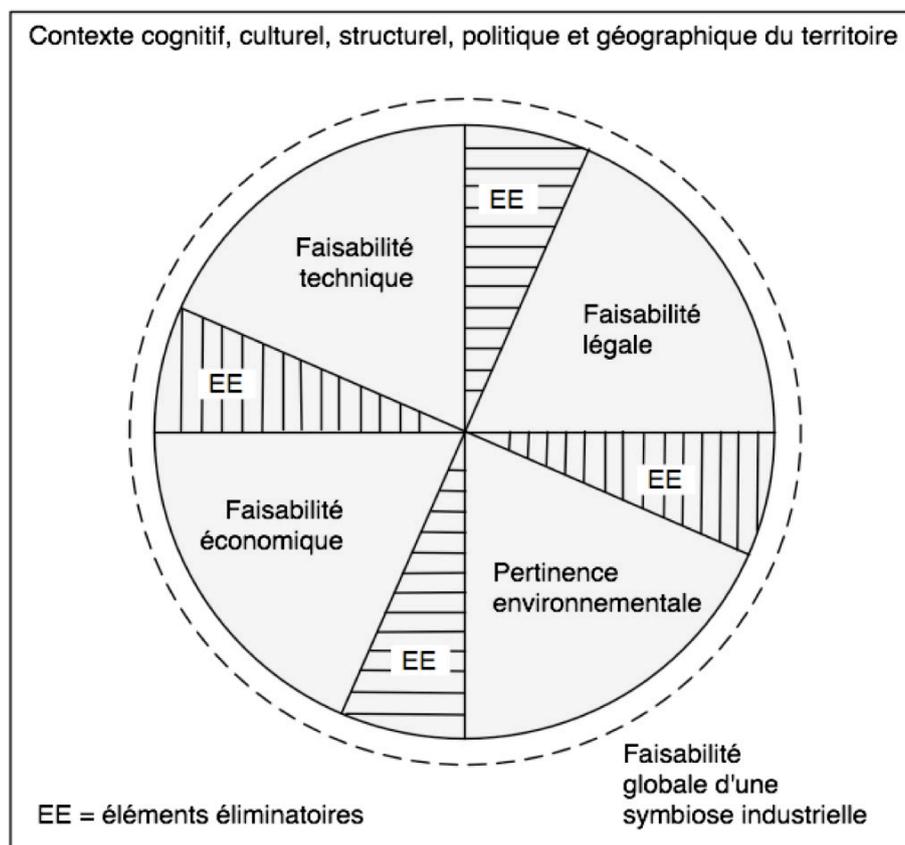


Figure 32 : Paramètres de faisabilité et de pertinence influençant la faisabilité globale des symbioses industrielles. Source : auteur.

Les effets indirects d'une synergie sur l'ensemble du système économique et social n'ont que très peu été analysés dans la littérature spécifique aux symbioses industrielles (Section 2.2.2). Nous essayerons

d'apporter des éléments pour discuter l'influence des symbioses industrielles sur l'ensemble de l'organisation du système économique dans le Chapitre 5. Les effets indirects, qui permettent de décrire l'influence des synergies dans le processus de transition industriel, serviront néanmoins de trame de fond pour cette section traitant de la faisabilité économique, ainsi que de la pertinence environnementale des symbioses industrielles. Dans cette recherche, les symbioses industrielles doivent en effet remplir le double objectif de réduire les impacts sur l'environnement tout en générant une marge bénéficiaire pour l'entreprise (comme cela a été expliqué dans la Section 1.4.3.1).

Une fois réalisés, les projets doivent être évalués dans le cadre plus large des politiques publiques de développement durable et de ses trois piliers : la solidarité sociale, la responsabilité écologique et l'efficacité économique. L'objectif de cette section n'est pas de développer un référentiel de durabilité exhaustif pour les symbioses industrielles. En particulier, les aspects non moins importants comme la durabilité sociale, l'équité ou la participation citoyenne ne sont pas abordés dans cette recherche, de même que l'équilibre entre les trois piliers du développement durable, objets de nombreuses discussions dépassant le cadre de ce travail.

Dans le cadre de cette recherche, nous avons réalisé un premier développement dans le but de créer un système d'indicateurs pour l'évaluation des symbioses industrielles potentielles. Son objectif est de qualifier et de quantifier leur faisabilité globale. Son développement n'est cependant pas abouti à l'heure actuelle. Le développement d'indicateurs ne constituant pas une fin en soi, nous nous sommes concentrés sur la discussion des paramètres pertinents pour l'évaluation et la mise en évidence des éléments éliminatoires. Les indicateurs ébauchés sont néanmoins présentés en Annexe 2.

2.4.1 La faisabilité technique

Le premier paramètre nécessaire pour l'évaluation de la faisabilité concerne les aspects techniques inhérents à la réutilisation d'un flux ou à la mutualisation de son approvisionnement et de son traitement. Le but de cette section est de tenter de répondre à la question suivante : la synergie considérée est-elle techniquement réalisable ?

La faisabilité technique englobe des considérations d'ordre physique, chimique et géographique. Les paramètres à étudier varient en fonction de la famille de flux considérée. L'audit d'entreprise inclut un certain nombre de paramètres permettant de réaliser cette analyse pour un flux et ses composants de manière qualitative ou quantitative en fonction de la précision des données disponibles. Les paramètres physiques, chimiques et géographiques sont tous intégrés dans la méthodologie d'audit des entreprises et détaillés à la Section 2.3.2.2. Dans le cas des paramètres géographiques, il s'agit essentiellement de pouvoir évaluer les distances parcourues, celles-ci influant la faisabilité économique et la pertinence environnementale. L'interprétation des paramètres techniques permet également d'évaluer la complexité de la mise en œuvre en déterminant si une adaptation du flux aux nouvelles conditions de réutilisation est nécessaire et si oui, réalisable.

Cyril Adoue a énoncé plusieurs paramètres à prendre en compte, soit l'adéquation qualitative, l'adéquation quantitative, l'adéquation temporelle et la faisabilité géographique (Adoue 2007). Ces quatre éléments permettent également d'aborder la question du dimensionnement des installations nécessaires à la mise en place de la symbiose ou de la synergie et d'initier une réflexion sur la meilleure technique disponible. Ils peuvent être étudiés séparément, mais la faisabilité technique est subordonnée aux quatre paramètres (Figure 33).

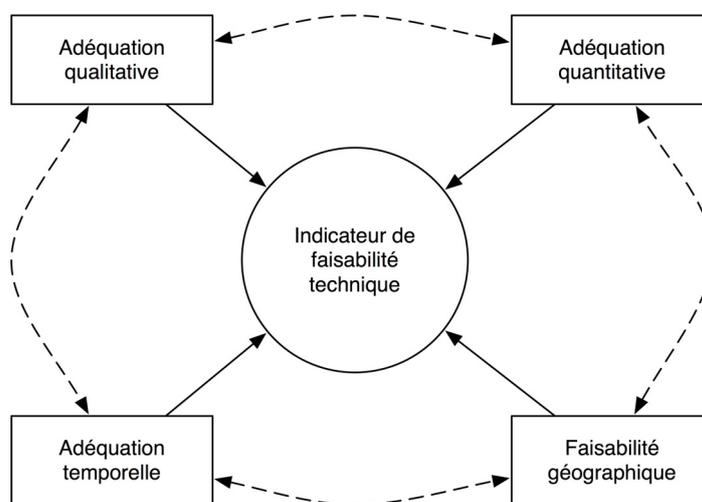


Figure 33 : Paramètres de l'indicateur de faisabilité technique des symbioses industrielles. Source : auteur.

2.4.1.1 Adéquation qualitative

L'utilisation d'un flux dans un procédé industriel entraîne le plus souvent une modification de ses caractéristiques physico-chimiques ou un mélange avec d'autres composants. Il est donc primordial que les caractéristiques techniques du flux de substitution proposé correspondent aux critères de qualité nécessaires à sa valorisation par une autre entité économique. Le respect des contraintes de pureté est une composante essentielle à la mise en œuvre d'un procédé industriel. Celles-ci vont empêcher la réalisation de nombreuses opportunités. Celles-ci doivent être discutées directement entre le coordinateur et les responsables de production de l'entreprise. Les données collectées concernent les paramètres physico-chimiques des flux et de ses composants : température, concentration, pression, pH, état ou phase, forme, qualité et potentiel énergétique. A l'origine, un champ *taux d'impureté et/ou de substance dissoute* était présent. Ces informations sont aujourd'hui indiquées comme composants du flux, même si

le composant est présent uniquement sous forme de traces. Cette solution permet une description plus détaillée de tous les composants d'un flux. Les données collectées varient en fonction de la nature du flux. A titre d'exemple, les champs concernant la pression ou le pH ne présentent pas d'intérêt pour un matériau solide.

L'adéquation entre l'état du flux sortant et les contraintes liées à sa réutilisation est estimée en tenant compte des possibilités de traitement intermédiaire. Il appartient au coordinateur de faire appel aux compétences techniques appropriées pour déterminer quand l'adéquation qualitative devient un élément éliminatoire. Celui-ci peut cependant proposer de modifier un paramètre physico-chimique afin de faciliter la réutilisation. Le coordinateur, au besoin conseillé par des experts, doit alors faire part de ses connaissances pour proposer des solutions issues de bonnes pratiques ou des recherches bibliographiques, adaptées au contexte de l'entité considérée. Si l'on considère le cas d'une synergie de mutualisation de traitement, l'adéquation qualitative entre les différents rejets est également un facteur important pour le dimensionnement des installations. A titre d'exemple, certaines activités du secteur du travail des métaux impliquent que l'entreprise possède son propre système de traitement des eaux incluant des procédés de traitement spécifiques aux effluents contenant des cyanures, des chromates ou des acides. L'entreprise pourra mutualiser ce traitement avec d'autres acteurs économiques du même secteur, mais probablement pas avec des secteurs d'activité différents à cause de la spécificité du traitement.

2.4.1.2 *Adéquation quantitative*

Le deuxième élément influençant la faisabilité technique d'une collaboration est l'adéquation quantitative entre l'offre et la demande. Ce ne sont cette fois plus les qualités intrinsèques du flux qui sont considérées mais la quantité disponible par rapport à celle demandée pour une réutilisation potentielle. Pour intéresser un industriel, un flux doit représenter l'entier ou au moins être du même ordre de grandeur que sa consommation ou que son rejet. Si l'offre est significativement supérieure à la demande, l'entité productrice hésitera à mettre en place une nouvelle solution qui ne permet la valorisation que d'une fraction du flux qu'elle rejette et entraînerait la multiplication des filières de valorisation. Une solution consiste à intéresser plusieurs repreneurs en conjuguant échange de co-produit et mutualisation de traitement, mais cette situation augmente la complexité et risque de ralentir la mise en œuvre. A contrario, lorsque l'offre est inférieure à la demande, c'est l'entité réceptrice qui fait face à un problème de complexité. Multiplier le nombre de sources d'approvisionnement implique un effort de gestion supplémentaire. Une trop grande complexité est considéré comme un élément éliminatoire à moins d'impliquer un intermédiaire dans le processus. Celui-ci peut alors collecté un grand nombre de flux de petite quantité afin de les regrouper et de les mettre à disposition de l'entreprise repreneuse. Cette pratique est très répandue dans le secteur de la production de ciment. Les entreprises Holcim et Lafarge

utilisent toutes les deux des intermédiaires pour se procurer des combustibles ou des matériaux de substitution (voir étude de cas du canton de Vaud, Section 4.3.1).

2.4.1.3 *Adéquation temporelle*

Approvisionner une entreprise en quantité suffisante n'est pas la seule contrainte auquel un coordinateur doit faire face. La dimension temporelle doit également être prise en compte au même niveau que la quantité. L'analyse de la disponibilité dans le temps des flux permet d'évaluer la continuité des échanges et les éventuels tampons ou stocks qui devront, le cas échéant, être prévus. En effet, certaines activités, par exemple dans le secteur agro-alimentaire, varient fortement en fonction des mois de l'année et des saisons. Un flux sortant pourrait être disponible uniquement en été, ou en automne, en fonction des périodes agricoles ou d'élevage. Les champs quantité et disponibilité dans le temps présents dans le formulaire de l'audit d'entreprise (Tableau 5) sont essentiels pour évaluer les facteurs saisonniers.

2.4.1.4 *Faisabilité géographique*

Finalement, la distance entre deux acteurs économiques et la nature des réseaux de transports existants sont des éléments déterminants de la faisabilité technique d'une synergie. Elle peut être mesurée sur la base de leurs coordonnées géographiques et grâce aux systèmes d'information géographiques (Chapitre 3). Lors de l'audit d'une entreprise, des informations sur le lieu d'approvisionnement, le lieu de valorisation, les distances parcourues et les moyens de transport utilisés sont collectées afin de faciliter la comparaison du cheminement des ressources. La *dispersion* des activités économiques sur le territoire considéré est un élément de la faisabilité technique. Si l'échelle géographique considérée est la zone industrielle, la proximité entre entités économiques est relativement faible. Lors l'on cherche à mettre en œuvre des symbioses industrielles à une échelle supérieure, comme le canton dans le contexte suisse, les entités sont dispersées sur l'ensemble du territoire, ce qui empêche la mise en place d'échanges par ailleurs pertinents. Il en est de même dans le cas d'une mutualisation de collecte ou de traitement : plus les partenaires potentiels de la synergie sont dispersés géographiquement, plus les coûts de collecte augmentent.

Les contraintes liées à la dispersion diffèrent à nouveau en fonction des familles de flux. En ce qui concerne les vecteurs énergétiques et l'eau, la distance de transfert est très limitée pour des raisons physiques (conservation de la chaleur ou du froid) ou/et économiques (construction d'infrastructures coûteuses, comme un pipeline). Pour ces deux familles de flux, il est en général admis que la distance est limitée à 1 ou 2 km. Une distance supérieure constitue un élément éliminatoire. Elle peut varier en fonction de la quantité considérée et des paramètres techniques du flux considéré. Dans le cas des autres familles de flux, la distance reste un élément important lié à la faisabilité légale (législation sur les transferts de matières dangereuses) et économique (mode et coûts de transport). Il est donc primordial non seulement

de connaître les distances entre les entités économiques concernées, mais également les réseaux de communication (rail, route, fluvial ou lacustre) existants ou planifiés. L'occupation du sol entre les entités constitue le dernier élément nécessaire en cas de construction d'une infrastructure de transfert. L'étude de la faisabilité géographique permet indirectement de calculer si la solution proposée réduit ou au contraire augmente les tonnes-kilomètres induites par l'activité considérée.

2.4.2 La faisabilité légale

Le paramètre législatif permet de prendre en considération ce qui est autorisé ou non par la législation en vigueur. Une modification de l'usage d'une ressource qui n'est pas permise par la loi n'est donc pas envisageable, sauf dans les cas où une adaptation de celle-ci se justifie. Dans ce dernier cas, il s'agit d'une action sur le long terme. Cette section étudie également la complexité de mise en œuvre en termes de démarches administratives. Il existe un grand nombre de procédures d'autorisation pour l'utilisation de certaines substances et pour le suivi des matières dangereuses. Il s'agit donc de déterminer si, premièrement, la loi fait mention explicite des flux de matière considérés et si elle émet des règles pour leur utilisation. Dans ce cas, ces règles s'appliqueront très probablement en cas de réutilisation. Deuxièmement, la législation peut indiquer une filière obligatoire pour leur élimination en fin de vie ou émettre des recommandations. Troisièmement, dans certains cas, des filières de valorisation spécifique à fort potentiel économique ou environnemental sont recommandées et favorisées par la législation et des mesures de soutien à la mise en œuvre existent.

Une barrière réglementaire peut être levée par une action au niveau politique, domaine bien distinct des sciences de l'ingénieur. Il est donc utile de dissocier les éléments techniques, propres aux entités économiques, des règles législatives et réglementaires énoncées par les pouvoirs publics. Évidemment, lors d'une analyse de faisabilité, les composantes techniques et légales sont en général étudiées conjointement.

La faisabilité légale d'une symbiose industrielle est fortement dépendante du territoire considéré. À titre d'exemple, la législation européenne sur les déchets ne facilite pas l'émergence de symbioses industrielles. Les politiques publiques qui en découlent sont des éléments déterminants pour évaluer la faisabilité légale d'une collaboration (Costa, Massard et al. 2010). La législation française nous apprend que le statut légal du déchet réduit la marge de manœuvre d'un coordinateur. En effet, lorsque qu'un co-produit est considéré comme un déchet, sa réutilisation par une autre activité économique implique une procédure d'autorisation souvent complexe et longue à obtenir. Cette situation handicape et ralentit la dynamique de collaboration entre acteurs économiques (Adoue 2007).

La Suisse est un cas particulier. Située géographiquement au centre de l'Union européenne, elle n'en fait pas partie et n'est donc pas soumise à ses lois. Nous allons voir par la suite que son organisation politique et ses lois en font un terrain privilégié pour étudier la faisabilité légale des symbioses industrielles.

2.4.2.1 La législation fédérale de gestion des déchets

La législation suisse sur les déchets est contenue principalement dans le quatrième chapitre de la Loi fédérale sur la protection de l'environnement (LPE 1983). L'énoncé du principe de la loi repose sur la notion de déchet, définie à l'art 7 al 6 :

Par déchets, on entend les choses meubles dont le détenteur se défait ou dont l'élimination est commandée par l'intérêt public.

Le premier terme, chose meuble, fait la distinction entre mobilier et immobilier. Selon le critère établi à l'art 713 CC (LPE 1983), une chose meuble est une chose qui peut se transporter d'un lieu à un autre. Même si ce critère inclut potentiellement toute substance chimique et par extension tout produit quel qu'il soit, certaines substances sont soumises à une réglementation particulière et peuvent de ce fait être exclues de la notion de déchet ou suivre un régime juridique plus strict.

Deuxième texte de loi essentiel, l'Ordonnance sur les mouvements de déchets détermine les modalités des transferts de flux entre entités économiques et recycleurs et les transferts transfrontaliers (OMoD 2005). Certaines familles de flux, cependant, ont leurs propres lois et ordonnances. La gestion des eaux usées, par exemple, est soumise à la Loi sur la protection des eaux (LEaux 1991) et à l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux 1998) et est exclue de l'OMoD. Les substances dangereuses possèdent également leur propre réglementation, soit l'Ordonnance sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (OChim 2005) et l'Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (ORRChim 2005). Le Tableau 6 détaille les textes de loi relatifs à chaque famille de flux en fonction de leur date d'entrée en vigueur.

L'article 30 de la Loi fédérale sur la protection de l'environnement propose un ordre de priorité pour la production, la prise en charge et la valorisation des déchets. Ils doivent premièrement être limités. Lorsque cela n'est pas possible, il est recommandé de les valoriser. Finalement, les fractions non valorisables doivent être éliminées de façon respectueuse pour l'environnement. Il s'agit d'une référence directe au principe des 3 R : Réduire, Réutiliser, Recycler. La législation se concentre à l'heure actuelle essentiellement sur les deuxième et troisième priorités des objectifs de gestion des déchets, soit la valorisation et l'élimination. Dans ces domaines, la Loi de protection de l'environnement (LPE 1983) stipule que :

Le Conseil fédéral peut prescrire que certains déchets doivent être valorisés si cela est économiquement supportable et plus respectueux de l'environnement que ne le seraient un autre mode d'élimination et la production de produits nouveaux.

L'ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990) ajoute que :

Il peut demander aux détenteurs de déchets qu'ils veillent à ce que certains de ces déchets soient valorisés si cette opération:

a. est techniquement possible et économiquement supportable;

b. est plus respectueuse de l'environnement que ne le serait l'élimination desdits déchets et la production de biens nouveaux ».

La Confédération peut donc définir le devenir préférentiel d'un déchet. Le principal critère de choix à retenir est l'interdiction légale de la dilution. L'article 10 de l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990) interdit aux détenteurs de déchets de mélanger avec ces derniers d'autres déchets (ou toute autre substance) si cette opération vise avant tout à réduire par dilution leur teneur en polluants afin de les rendre conformes aux dispositions relatives à la remise, à la valorisation ou au stockage définitif. Ce principe, qui empêche ainsi le sous-cyclage de déchets contenant des substances dangereuses est destiné à empêcher la diffusion lente de substances polluantes dans le milieu naturel.

Parallèlement à cela, la réduction des déchets à la source est difficile à mettre en place dans le cadre d'une législation fédérale. La législation prévoit néanmoins la possibilité d'interdire la mise dans le commerce de produits destinés à un usage unique et de courte durée, d'interdire l'utilisation de substances ou d'organismes qui compliquent notablement l'élimination, ou encore la possibilité d'obliger les fabricants à prévenir la formation des déchets de production pour lesquels aucune méthode d'élimination respectueuse de l'environnement n'est connue (LPE 1983). Il semble que ces mesures n'aient été encore que peu appliquées. Lorsqu'elles le sont, elles ne s'appliquent qu'à des cas ciblés.

Tableau 6 : Législation environnementale suisse influençant le développement des symbioses industrielles. Source : auteur.

Date de création	Abréviation	Titre	Loi n°	Famille de flux concernée
1933	LCMP	Loi fédérale sur le contrôle du commerce des métaux précieux et des ouvrages en métaux précieux	941.31	Métaux
1983	LPE	Loi sur la protection de l'environnement	814.01	Toutes
1985	Opaïr	Loi sur la protection de l'air	814.318.142.1	Toutes s/ eau
1990	OTD	Ordonnance sur le traitement des déchets	814.6	Toutes
1991	LEaux	Loi fédérale sur la protection des eaux	814.2	Eau
1991	OPAM	Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs	814.012	Toutes
1991	LFo	Loi sur les forêts	921	Bois / matières organiques
1995	OFE	Ordonnance contre les épizooties	916.401	Produits chimiques / matières organiques
1997	OCOV	Ordonnance sur la taxe d'incitation sur les composés organiques volatils	814.018	Produits chimiques
1998	LEne	Loi sur l'énergie	730	Energie
1998	OEaux	Ordonnance sur la protection des eaux	814.201	Eau
1998	OEné	Ordonnance sur l'énergie	730.01	Energie
1998	OSol	Ordonnance sur les atteintes portées au sol	814.12	Eau
1999	LCO2	Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO ₂	614.71	Energie
2000	Lchim	Loi fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses	813.1	Produits chimiques
2001	OEng	Ordonnance sur la mise en circulation des engrais	916.171	Produits chimiques / bois
2005	OChim	Ordonnance sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses	813.11	Produits chimiques
2005	OMoD	Ordonnance sur les mouvements de déchets	814.61	Toutes s/eau et énergie
2005	ORRChim	Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux	814.81	Produits chimiques / bois
2007	OCO ₂	Ordonnance sur la taxe sur le CO ₂	641.712	Energie

2.4.2.2 Les différents types de déchets

L'article 31b de l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990) établit une distinction entre déchets urbains et déchets non-urbains. Ces derniers regroupent principalement les déchets d'entreprises, qualifiés d'«autres déchets», de l'Allemand «übrige Abfälle». L'élimination des déchets urbains est du ressort des cantons, qui peuvent déléguer ces tâches aux communes ou à des prestataires privés. Par contre, l'élimination des autres déchets revient au détenteur (soit le producteur du déchet) qui doit en assumer les frais ou les éventuels bénéfices. Il peut également recourir à des intermédiaires.

La loi établit une seconde distinction, entre les déchets dangereux, qualifiés de « spéciaux » et les « non-dangereux », à nouveau qualifiés d'«autres déchets». Il y a donc confusion possible en français entre des mêmes termes qui recouvrent des situations différentes, confusion qui n'apparaît cependant pas en allemand, le texte précisant soit « übrige Abfälle » dans le cas des déchets ménagers ou urbains et « andere Abfälle » en ce qui concerne les déchets dangereux. Les déchets spéciaux sont définis à l'article 2 alinéa 2 let a de l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005) :

Les déchets spéciaux, pour être éliminés de manière respectueuse de l'environnement, requièrent, en raison de leur composition ou de leurs propriétés physico-chimiques ou biologiques, un ensemble de mesures techniques et organisationnelles particulières même en cas de mouvements à l'intérieur de la Suisse.

L'article 2 alinéa 2 let b définit encore les « autres déchets soumis à contrôle », comme ceux requérant un nombre restreint de mesures. Le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC) a établi une liste de déchets en annexe de l'OMoD, en précisant à chaque fois s'il s'agissait de déchets autres ou de déchets spéciaux (dans les deux cas des « andere Abfälle en allemand).

La distinction entre déchets spéciaux et autres déchets est importante pour le détenteur, car tous ses déchets ne sont pas soumis au même régime juridique. Le détenteur de déchets spéciaux ne peut les remettre qu'à une entreprise titulaire d'une autorisation. Il est également tenu de remplir des documents de suivi dans certaines conditions. Les entreprises d'élimination, soit les entités de recyclage ainsi que de transport sont également soumises à un régime particulier d'autorisations et de notifications. L'exportation de ces déchets est soumise à autorisation et n'est permise que vers certains pays, notamment l'OCDE. Lorsque le déchet n'est pas considéré comme « spécial » ou comme « autre déchet soumis à contrôle », les conséquences juridiques sont moins claires. L'article 30g de la LPE étend les pouvoirs du Conseil Fédéral pour édicter des prescriptions sur le mouvement des autres déchets, base qui, bien que citée dans le préambule de l'OMoD, ne semble pas être utilisée à l'heure actuelle.

2.4.2.3 *La législation fédérale sur les déchets et les symbioses industrielles*

Les différents types de symbioses industrielles ne peuvent pas tous être considérés de la même manière. L'analyse de la législation proposée précédemment indique que seuls les échanges de co-produits à proprement parler sont considérés comme problématiques. A contrario, la mutualisation de services ou d'infrastructures ne pose pas de problème juridique particulier étant donné l'absence de transfert direct de déchets à une autre entreprise. Ainsi, les échanges de co-produits entrent par définition dans le cadre du premier objectif de réduction des déchets énoncé par la LPE : la valorisation. Ils contribuent à diminuer la production de déchets, non pas en réduisant les déchets d'une entreprise, mais en substituant des intrants par des produits autrement considérés comme déchets. Ils préviennent ainsi l'extraction des matières premières à la source. Il est donc possible de conclure qu'un échange des « déchets » remplit trois des missions que la LPE s'est fixée : il permet de réduire la consommation des matières premières et donc de conserver durablement les ressources (art 1 al 1 LPE), de réduire la production de déchets (art 30 al 1 LPE), et de valoriser (art 30 al 2 LPE) les déchets plutôt que de les éliminer (art 30 al 3 LPE).

Matthieu Stigler (2008), qui a pris part à nos recherches en tant que civiliste, a approfondi les aspects juridiques mentionnés précédemment. Il en ressort que bien que les symbioses industrielles apparaissent comme des mesures favorables aux objectifs de la loi, le cadre juridique qui délimite leur faisabilité peut s'avérer restrictif au niveau fédéral. Le tribunal fédéral a en effet affirmé lors d'un jugement servant aujourd'hui de jurisprudence (Contex 1997), que pour être qualifié de déchet :

- La réutilisation du bien ne jouait pas de rôle (cons. 4a) ;
- Le bien pouvait avoir une valeur économique (cons. 4a) ;
- Le terme « se défaire » pouvait inclure des bien échangés ou vendus (cons. 4b cc).

Ces éléments peuvent freiner l'échange d'un flux dans le cadre d'une symbiose industrielle si le statut de déchet lui est attribué, de par le régime plus restrictif qui y est associé. En effet, le fait que ce flux soit réutilisé dans le cadre d'une activité économique et permet d'éviter la génération d'autres déchets n'est pas à prendre en compte selon le tribunal fédéral. Le fait qu'un flux soit vendu à une autre entreprise, répondant ainsi à une demande commerciale, n'empêche pas que le flux puisse être considéré comme un déchet. La haute cour a cependant déterminé le statut des biens d'après le type de circuit vers lequel les choses meubles étaient acheminées, soit, en l'occurrence, une filière classique de recyclage. Dans le cas des échanges de flux entre deux entités économiques, l'entité de recyclage fait défaut et reste dans ce que le tribunal fédéral qualifie de cycle économique normal. La législation spécifie également que la chose meuble qualifiée de déchet gardait ce statut jusqu'à sa réintroduction dans le circuit économique. En suivant le raisonnement appliqué dans l'affaire Contex, les flux échangés dans le cadre de symbioses industrielles ne seraient donc pas qualifiés de déchets. Cependant, ce raisonnement a été critiqué du fait de la circularité dans la définition conjointe du déchet et du circuit d'élimination de déchet.

Enoncer une conclusion quant à la faisabilité des symbioses industrielles au regard de la législation fédérale n'est donc pas chose facile. Il apparaît en tout cas que l'interdiction d'un échange de flux entre

deux entreprises n'est pas inscrite dans la législation. La faisabilité légale des échanges doit donc être discutée au cas par cas, en se référant au contexte local. Les cantons ont effectivement une grande influence sur les stratégies de gestion des déchets. Ils sont responsables de la mise en application des lois fédérales, de la gestion des déchets et de ses modalités.

2.4.2.4 Apport des législations cantonales : exemple du droit cantonal genevois

La loi genevoise sur la gestion des déchets (LGD 1999) soumet toutes les entreprises d'élimination de déchets (entités de recyclage) à une procédure d'autorisation impliquant également la conclusion d'une assurance et la possibilité de subir des contrôles, à la charge de l'entreprise. Si l'installation élimine plus de 1000 tonnes par an, elle doit en plus réaliser une étude d'impact. Il est intéressant de constater que le canton de Genève possède une législation très contraignante en matière d'échanges de déchets, quand bien même il a initié un projet de détection et de mise en œuvre des symbioses industrielles.

Afin de vérifier sa conformité au droit fédéral et cantonal, les autorités cantonales et le groupe de travail Ecosite ont décidé la mise en place d'une procédure pour tout échange de flux. Légalement, il existe essentiellement deux cas. Premièrement, s'il agit d'un déchet non soumis à la législation sur les déchets spéciaux ou soumis à contrôle (OMoD 2005), il peut être échangé directement entre deux entreprises, sans demande préalable auprès de l'Etat. Deuxièmement, si le flux est considéré comme déchet spécial ou soumis à contrôle, la procédure d'autorisation pour le transfert du flux doit être effectué auprès du service compétant, de la même manière que si le flux était remis à un recycleur. Un formulaire de suivi doit donc être rempli, afin de ne pas perdre la trace des transferts de matières représentant un risque pour l'environnement. Le devenir du flux est également étudié afin de s'assurer que la symbiose n'accroisse pas le risque ni les impacts sur l'environnement (Figure 34).

2.4.2.5 Apport des législations cantonales : exemple du droit cantonal vaudois

Contrairement à la loi Agenda 21 du canton de Genève, la législation vaudoise ne mentionne par explicitement les symbioses industrielles. Cependant, la Ville encourage depuis plus de 20 ans un usage rationnel de l'énergie et l'utilisation des ressources les moins polluantes. L'art 24 de la Loi sur la gestion des déchets (LDG 2006) énonce également le besoin de réaliser une étude d'impact sur l'environnement pour toute entreprise d'élimination ayant une capacité supérieure à 5000 tonnes par an²³, ou si le déchet considéré représente un risque pour l'environnement. Dans ce dernier cas, l'entité de recyclage devra en plus souscrire une assurance pour les dégâts potentiels. Ainsi, les cas de Genève et Vaud apparaissent comme très similaires. Dès lors, la procédure d'autorisation nécessaire à la mise en place d'une symbiose industrielle peut être résumée dans le deux cas par la Figure 34.

²³ Cette valeur vient d'être relevée de 1000 tonnes à 5000 tonnes par an

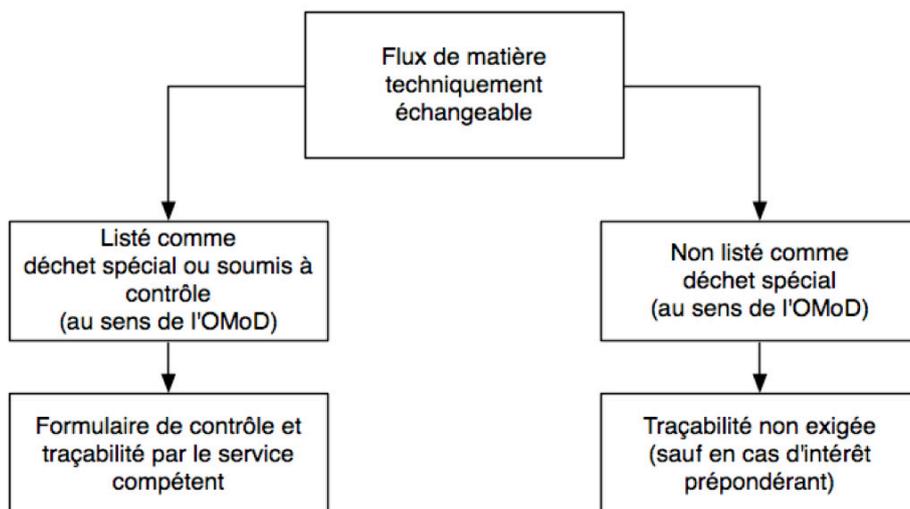


Figure 34 : Procédure d'autorisation pour l'échange de co-produits / sous-produits dans les cantons de Genève et Vaud. Source : auteur.

2.4.2.6 Conclusion sur la faisabilité légale

Les considérations précédentes permettent de dresser une échelle qualitative de la faisabilité légale d'une synergie en Suisse. Celle-ci est basée sur l'analyse des lois et ordonnances listée dans le Tableau 6 de la page 126.

Le cas le plus favorable se produit lorsque la législation en vigueur contient explicitement une incitation légale à la réutilisation d'un flux. De telles mentions concernent essentiellement le recyclage de certaines substances comme le verre, le PET ou le papier à l'heure actuelle (Chapitre 4). Deuxièmement, lorsqu'il n'existe pas de barrières légales ou que certaines contraintes existent, comme le suivi d'un déchet dangereux, la réalisation d'une synergie est possible. Les cas suivants sont moins favorables et représentent dans la majorité de cas des éléments éliminatoires : certaines filières de valorisation étant interdites par la loi. Il s'agit en particulier des solutions considérées comme du sous-cyclage, à l'exemple de l'épandage des boues issues du traitement des eaux qui contiennent des métaux lourds. L'interdiction d'une valorisation est donc liée au risque qu'elle représente pour l'environnement et pour le citoyen. Il est important de souligner que lorsqu'un collecteur de déchets prend en charge un flux, la responsabilité de sa valorisation ou de son élimination lui échoit. Ainsi, dans le cas d'un échange de co-produit entre deux entreprises, la question du transfert de la responsabilité juridique se pose. En fonction des éléments

présentés précédemment, l'entreprise productrice du déchet impliqué dans l'échange reste responsable. Nous reviendrons plus tard sur cette affirmation qui influence grandement les choix des entreprises.

En conclusion, s'il fallait introduire le concept des symbioses industrielles dans la législation fédérale, dans le but d'encourager leur mise en œuvre, une partie de la définition devra se rapporter au contexte législatif à l'échelle nationale. Or, celui-ci intègre déjà parfaitement les intermédiaires dans son fonctionnement, mais ne considère pas les échanges directement entre entreprises. Les symbioses industrielles, pour introduire de nouvelles opportunités, devront mettre l'accent sur les échanges directs, la mutualisation et le partage d'infrastructure entre les entreprises du territoire considéré dans le but de réduire la consommation de ressources et de favoriser leur valorisation directe dans les limites du territoire national.

2.4.3 La faisabilité économique

La mise en place d'une synergie modifie l'organisation et la logistique des activités économiques concernées. Cela peut engendrer des coûts supplémentaires mais également générer des bénéfices dus à l'économie d'une ressource et à sa substitution et/ou mutualisation. Pour intéresser un acteur économique, une symbiose industrielle doit représenter une plus-value financière et doit lui permettre de réduire les coûts de production d'un produit. Il s'agit dès lors d'une stratégie dite d'éco-efficacité dont l'objectif est de favoriser les projets générant un double gain environnemental et économique (Chapitre 1). Il est alors possible de parler de solution gagnant-gagnant pour l'environnement et l'économie.

L'évaluation de la faisabilité économique consiste en la quantification des coûts et des gains relatifs à la mise en place d'une synergie par l'intermédiaire d'une analyse coûts/bénéfices et en une comparaison de la solution proposée avec la situation existante. Le premier élément d'analyse dont dispose un coordinateur de projet provient de la classification du flux considéré selon sa valeur économique (voir Section 1.4.3.2 et le référentiel développé par Lambert (2001)). La littérature et l'étude des filières de valorisation existantes permettent fréquemment de déterminer la nature économique du flux : co-produit, sous-produit ou produit résiduel.

Pour évaluer avec plus de précision le bénéfice potentiel d'une opportunité, il est nécessaire de reprendre les résultats des indicateurs techniques et légaux. Ceux-ci nous renseignent sur les coûts de mise en place et de fonctionnement des échanges et permettent d'évaluer leur viabilité. Les paramètres à prendre en compte pour décrire une synergie en termes de flux financiers ont été étudiés par plusieurs auteurs (Chertow et Lombardi 2005; Kurup, Altham et al. 2005; Karlsson et Wolf 2008). Ceux-ci peuvent être positifs (augmentation de la marge bénéficiaire) ou négatifs (augmentation des coûts). Desrochers (2004) aborde quant à lui les contraintes liées à la mise en place d'une synergie dans une économie de marché. En s'appuyant sur les sources précédentes et en se référant aux études de cas de Genève et de

Lausanne Région, il est possible de dresser la liste des composantes d'un modèle économique spécifique à la problématique des symbioses industrielles (Tableau 7).

Les paramètres du Tableau 7 ont été utilisés par Matthieu Stigler, civiliste à l'IPTEH en 2008 pour proposer des équations permettant de calculer le bilan financier d'une symbiose industrielle. Le modèle et ses variations développés dans les sections suivantes concernent le cas simple dans lequel une entité modifie son approvisionnement en substituant complètement sa matière première par un co-produit ou un sous-produit d'une autre entité (échange de co-produit). Les équations présentées ici traitent du cas de la substitution complète d'un flux, acheté précédemment auprès d'un fournisseur classique, par un co-produit provenant d'une autre entité économique. Le modèle coûts/bénéfices proposé inclut les possibilités d'aide au financement offertes par les politiques publiques fédérales et cantonales en Suisse.

Tableau 7 : Paramètres du modèle économique de mise en œuvre des symbioses industrielles basé sur l'analyse coûts/bénéfices. Source : auteur et (Stigler 2008).

	Entité productrice	Entité réceptrice
Bénéfices	<p><i>Influence directe</i></p> <p>Eviter ou diminuer les coûts d'élimination des co-produits et sous-produits</p> <p>Eviter ou diminuer les coûts de stockage des déchets</p> <p>Augmenter le prix de vente des déchets si leur valeur est supérieure à 0.</p> <p>Subventions à la mise en œuvre (centime climatique) ou exonérations fiscales (taxe CO₂).</p> <p>Pérennisation de l'activité par une meilleure intégration de l'entreprise dans son environnement</p> <p><i>Influence sur le territoire</i></p> <p>Diminution relative de la pression sur les ressources échangées à l'échelle du territoire considéré, donc diminution des coûts d'approvisionnement / désapprovisionnement</p> <p>Tendance à une diminution de la volatilité des prix</p> <p>Pérennisation du tissu économique</p>	<p><i>Influence directe</i></p> <p>Diminuer les coûts d'approvisionnement.</p> <p>Baisse de la dépendance aux fournisseurs habituels</p> <p>Sécurisation de l'approvisionnement sur le long terme</p> <p>Subventions à la mise en œuvre (centime climatique) ou exonérations fiscales (taxe CO₂)</p> <p>Pérennisation de l'activité par une meilleure intégration de l'entreprise dans son environnement</p>
Coûts	<p><i>Influence directe</i></p> <p>Frais d'infrastructure</p> <p>Frais de main d'œuvre liés à la mise en œuvre et à l'opération (opération, traitement intermédiaire, contrôle qualité)</p> <p>Accroissement de la dépendance technique et financière par rapport à d'autres entités économiques</p>	<p><i>Influence directe</i></p> <p>Frais d'acheminement</p> <p>Frais de main d'œuvre liés à la mise en œuvre et à l'opération (opération, traitement intermédiaire, contrôle qualité)</p> <p>Perte de flexibilité dans la gestion des flux et stocks</p> <p>Accroissement de la dépendance technique et financière par rapport à d'autres entités économiques</p>

2.4.3.1 Echange de co-produits : modèle économique pour l'entreprise productrice

Une entreprise qui souhaite changer la filière de prise en charge d'un co-produit pour mettre en place un échange avec un autre acteur économique, doit analyser les contraintes financières présentées à

l'équation (1). La quantité est en tonnes (t) et le bilan financier est calculé en francs suisses (CHF) sur une base annuelle (an).

$$p^S x \geq t^S x + C^S x + I^S - S^S - p^E x - C^E x \quad (1)$$

x : quantité échangée par unité de temps (t/an)

p^S : prix de vente unitaire du co-produit par l'entité productrice (CHF/t)

p^E : prix de vente (>0) ou coût (<0) unitaire pour la prise en charge du déchet par une entité de recyclage (CHF/t)

C^E : coût unitaire de la taxe d'élimination du co-produit (CHF/t)

t^S : coût de transport unitaire depuis l'entité productrice (CHF/t)

C^S : coût unitaire de contrôle du flux, incluant les frais de fonctionnement, de maintenance et d'entretien (CHF/t)

I^S : investissements annualisés liés à la mise en place de l'échange (CHF/an)

S^S : subventions annualisées obtenues pour la mise en place de l'échange (CHF/an)

L'équation (1) représente le cas plus simple, lorsqu'une entité économique vend tout ou partie d'un co-produit à une autre entité économique (ou éventuellement à un intermédiaire). Le prix de vente est déterminé en fonction des coûts de mise en œuvre et de contrôle, et du coût antérieur de prise en charge par un prestataire de service. Le prix de vente total pour une quantité x doit être supérieur à l'ensemble des coûts. En établissant un bilan sur une base annuelle, l'équation (1) ne tient pas compte de l'amortissement progressif des coûts d'investissement. La quantité minimum échangeable par année pour atteindre le seuil de rentabilité et permettre aux partenaires de générer un bénéfice peut être calculé en résolvant l'équation pour x . En faisant varier les paramètres liés à l'investissement (I^S) et aux subventions (S^S), il est possible de calculer la rentabilité de la solution proposée sur le long terme.

$$p^S x + p^E x + C^E x \geq t^S x + C^S x + I^S - S^S \quad (2)$$

L'équation (2) permet d'évaluer la marge d'action de l'entreprise pour la mise en place de procédés d'adaptation du flux, de stockage et de contrôle qualité. Elle montre que pour que la synergie soit rentable, la différence entre le prix de vente du co-produit et le prix ou le coût obtenu auparavant auprès de l'entité de recyclage ou de prise en charge, doit être supérieure aux coûts engendré par la mise en place de l'échange. A nouveau, la quantité minimum pour atteindre le seuil de rentabilité peut être calculée en résolvant l'équation pour x .

2.4.3.2 *Echange de co-produits: modèle économique pour l'entité réceptrice*

Une entité qui souhaite changer sa source d'approvisionnement et réutiliser un co-produit provenant d'une autre entité peut s'appuyer sur l'équation (3) pour calculer le coût d'achat du co-produit :

$$p^S x \leq p^A x - t^S x - C^S x - I^S + S^S \quad (3)$$

p^S : prix d'achat unitaire du co-produit par l'entité réceptrice (CHF/t)

p^A : prix d'achat unitaire auprès d'un fournisseur classique (CHF/t)

t^S : coût de transport unitaire depuis l'entité productrice (CHF/t)

x : quantité échangée par unité de temps (t/an)

C^S : coût unitaire de contrôle du flux, incluant les frais de roulement, de maintenance et d'entretien (CHF/t)

I^S : investissements liés à la mise en place de l'échange (CHF/an)

S^S : subventions obtenues pour la mise en place de l'échange (CHF/an)

Ainsi, le prix unitaire d'achat du co-produit par l'entité réceptrice doit être inférieur au prix d'approvisionnement auprès d'un fournisseur classique. A cela doivent être ajoutés les coûts liés à la mise en œuvre et à l'opération de l'échange comme les coûts unitaires du transport, les coûts unitaires pour le contrôle qualité, la maintenance et l'entretien des infrastructures, les investissements nécessaires à la mise en œuvre (procédés intermédiaires, stock tampon). A ce total doit être soustrait le montant des subventions obtenues. Il s'agit donc de conditions contraignantes impliquant qu'il est nécessaire d'échanger une quantité minimum pour atteindre le seuil de rentabilité. La quantité minimum est atteinte pour la valeur de x équilibrant l'équation (3). Celle-ci pourra alors être comparée aux résultats de l'adéquation quantitative définie à la Section 2.4.1.2.

Il est possible de retourner l'équation (3) pour montrer que les coûts liés à la transaction doivent être inférieur à la somme des bénéfices générés par le changement de fournisseur (économie sur le prix d'achat et sur le transport). A nouveau, le bilan est réalisé sur une base annuelle. En faisant varier les paramètres liés à l'investissement (I^S) et aux subventions (S^S), il est possible de calculer la rentabilité de la solution proposée sur le long terme.

L'équation (4) permet de déterminer la marge que possède l'entité réceptrice pour adapter sa production pour la réutilisation du co-produit et garantir une marge bénéficiaire.

$$p^A x - p^S x \geq t^S x + C^S x + I^S - S^S \quad (4)$$

2.4.3.3 Mutualisation d'approvisionnement ou de traitement

Les équations 1 à 4 peuvent être adaptées au cas où plusieurs entités unissent leurs efforts pour s'approvisionner ou pour améliorer la prise en charge de leurs déchets. Le cas du partage d'infrastructures, qui est celui qui apparaît comme le plus intéressant dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne peut être explicité par l'équation (5). Il s'agit du même modèle économique que dans le cas d'une symbiose industrielle, mais impliquant plusieurs entreprises réceptrices. L'investissement est alors conjoint et les coûts partagés en fonction de la quantité x achetée.

$$p^S \sum_{i=1}^n x_i \leq p^A \sum_{i=1}^n x_i - t^S \sum_{i=1}^n x_i - C^S x - I^S + S^S \quad (5)$$

p^S : prix d'achat unitaire du flux par les entités réceptrices (CHF/t)

p^A : prix d'achat unitaire auprès d'un fournisseur classique (CHF/t)

t^S : coût de transfert unitaire depuis l'infrastructure partagée (CHF/t)

x : quantité totale utilisée (t/an)

x_i : quantité utilisée par chaque entité i (t/an)

C^S : coût unitaire de contrôle du flux, incluant frais de roulement, de maintenance et d'entretien de l'infrastructure (CHF/t)

I^S : investissements liés à la construction de l'infrastructure (CHF/an)

S^S : subventions obtenues pour la construction de l'infrastructure (CHF/an)

Le prix d'achat fixé pour les entités partenaires de la mutualisation dépend souvent des quantités achetées par ceux-ci. Plus la consommation est élevée, plus le gain par rapport à la situation antérieure sera important, permettant ainsi un investissement plus conséquent.

2.4.3.4 Exemples de sources de subventions pour la Suisse

Le coordinateur peut aider une entreprise dans la recherche de solutions de financement, comme des subventions publiques. Il existe en effet de nombreuses formes d'aides ou de subventions publiques ou privées visant à inciter les entreprises et les particuliers à agir. La plupart des possibilités de financement, à l'échelle fédérale et cantonale découlent de la loi sur le CO₂ (LCO2 1999), document fondateur de la politique climatique suisse. Celle-ci vise à réduire les émissions de CO₂ dues à l'utilisation énergétique d'agents fossiles ou non dans le secteur privé.

Premièrement, la taxe sur le CO₂, issue d'une ordonnance entrée en vigueur le premier janvier 2008 (OCO2 2007), consiste à taxer la consommation de combustibles fossiles. Sont considérés comme combustibles les agents énergétiques fossiles utilisés pour produire de la chaleur, de l'électricité ou pour

faire fonctionner une installation de couplage chaleur-force. L'objectif de la loi est de diminuer leur consommation par une mesure dissuasive d'ordre financière. Les recettes prélevées sont redistribuées à la population, par l'intermédiaire de l'assurance maladie (LAMal), et aux entreprises, en proportion de leur masse salariale soumise à l'AVS. Autre mesure incitative, les entreprises qui s'engagent formellement à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre sont exemptées de la taxe. Une symbiose industrielle entraînant une réduction des émissions de dioxyde carbone permet par exemple dans certains cas aux entités économiques concernées d'être exemptées de la taxe. Le montant de la subvention est proportionnel au nombre de tonnes non émises dans l'atmosphère. Le montant de la taxe s'élève, depuis le 1 janvier 2009, à 24 CHF/tonne de CO₂ émise en 2007 qui dépasse, selon les statistiques de l'OFEV, 90% du niveau de 1990 (OCO₂ 2007). La possibilité d'être exempté de la taxe constitue une incitation majeure de la politique climatique et énergétique de la Suisse et elle est très fréquemment citée par les entités économiques elles-mêmes dans le cadre des études de cas.

La deuxième mesure incitative est la possibilité d'une subvention par la Fondation Centime Climatique. Il s'agit d'une mesure volontaire des milieux économiques suisses. Sa création en 2005 par l'Union Pétrolière visait à permettre à la Suisse d'atteindre les objectifs fixés par le protocole de Kyoto tout en évitant à la mise en place d'une taxe sur les carburants similaire à celle sur les combustibles. Depuis le 1 octobre 2006, le montant de la contribution à la fondation s'élève à 1,5 centimes par litre sur toutes les importations d'essence et de diesel. Le montant collecté, soit environ 100 millions de CHF par an, est redistribuée dans le cadre de projets permettant par exemple aux entreprises d'accéder à des financements pour des améliorations destinés à éviter des émissions de CO₂. Les montants obtenus sont proportionnels au nombre de tonnes économisées²⁴. La Fondation Centime Climatique est depuis sa création un élément incontournable pour tout projet touchant directement ou indirectement à la problématique de la consommation de carburants et de combustibles. Indirectement, par exemple, un projet visant à économiser de l'eau, pourra être financé en justifiant l'économie de combustible générée en évitant le pompage, la purification, l'acheminement et le traitement du flux.

La problématique du réchauffement climatique et des gaz à effet de serre ne sont cependant qu'une composante des impacts des activités économiques sur l'environnement. La taxe d'incitation sur les émissions de composés organiques volatils (COV) découlant de l'Ordonnance sur la taxe d'incitation sur les composés organiques volatils constitue un autre exemple (OCOV 1997). Les COV sont des solvants volatils présents dans les peintures, les vernis, les détergents ou les produits cosmétiques. Depuis 2003, la taxe s'élève à 3 CHF par kilo de COV. Cependant, les COV utilisés de manière à ce qu'ils ne s'échappent pas dans l'environnement et les COV qui sont exportés sont exonérés de la taxe. A nouveau, la perspective de pouvoir être exonéré de la taxe est un argument en faveur des synergies régionales de ressources.

²⁴ <http://klimarappen.ch/fr/>, site consulté le 20 avril 2009.

Les possibilités de financement existantes à l'échelle fédérale et cantonale sont reprises et détaillées dans les études de cas présentées dans le Chapitre 4.

2.4.3.5 Conclusion sur la faisabilité économique

Les cinq équations proposées dans cette section permettent de réaliser un bilan financier de la mise en œuvre d'une symbiose industrielle, et ce pour les différents acteurs impliqués. La plus-value est calculée sous la forme du bénéfice annuel net généré. Il est possible de répéter ce modèle sur plusieurs années afin de déterminer le temps de retour sur investissement. Ces informations sont évidemment cruciales pour convaincre les industriels de s'engager dans une collaboration impliquant plusieurs entreprises et induisant une modification de leurs habitudes. Il faut signaler que, dans la pratique, seules les synergies présentant un intérêt environnemental doublé d'un intérêt économique sont présentées aux entreprises afin d'aboutir à la mise en place de solutions gagnant-gagnant-gagnant, signifiant un gain pour les deux entreprises et pour l'environnement.

Les informations collectées dans le cadre de la méthodologie d'audit ne permettent pas de déterminer l'ensemble des variables des équations. Lorsqu'il réalise une simulation économique complète, le coordinateur doit donc demander l'assistance des acteurs économiques concernés.

Néanmoins, les équations proposées permettent d'évaluer au cas par cas la faisabilité économique d'une opportunité de symbiose, même si toutes les données ne sont pas disponibles. Le coordinateur pourra ainsi déterminer de prime abord si une solution représente une rentabilité forte en évaluant les revenus générés et le temps de retour sur investissement. Plus la rentabilité d'un échange sera faible, plus il devra déployer d'efforts pour convaincre les acteurs économiques de le mettre en œuvre. Un coût trop élevé, impliquant un retour sur investissement sur plus de 3 ans, ainsi qu'un coût unitaire plus élevé que pour l'achat d'un produit neuf, sont considérées comme des éléments éliminatoires.

Les considérations précédentes ne tiennent cependant pas compte des bénéfices en termes d'image. La participation d'une entreprise à un réseau symbiotique permet souvent d'accroître sa visibilité. Les investissements nécessaires à la modification de ses habitudes pourraient dans certains cas être considérés comme un coût lié au marketing de la marque ou d'un produit.

2.4.4 La pertinence environnementale

Comme nous l'avons déjà expliqué, l'objectif premier des symbioses industrielles est de diminuer les impacts des activités économiques sur l'environnement. Dans le but de les maîtriser et de les réduire, la Suisse a édicté de nombreuses lois et ordonnances régissant l'utilisation de certaines substances, leur transport, leur stockage, ainsi que leur fin de vie (Section 2.4.2). L'évaluation de l'efficacité environnementale d'une activité ou d'un système peut être approchée de deux manières. La première consiste à mesurer l'intensité des impacts sur l'environnement. Comme défini en introduction (Chapitre 1),

la méthode la plus pertinente pour déterminer et quantifier précisément les impacts environnementaux est l'analyse de cycle de vie (ACV). Une méthodologie d'évaluation des impacts développée à l'EPFL, Impact 2002+, traite de quatre catégories d'impacts : sur la santé humaine, sur la qualité des écosystèmes, sur les changements climatiques et sur les ressources (Jolliet, Margni et al. 2003). La deuxième concerne la notion de risque industriel. La technologie et les substances utilisées peuvent représenter un risque variable pour l'environnement (y compris la santé humaine), si une substance est émise dans l'environnement durant une des étapes de son cheminement. Des règles très strictes ont ainsi été fixées en Suisse pour l'utilisation et le stockage de certaines substances (OPAM 1991).

Il semble donc indispensable de disposer d'un référentiel permettant d'évaluer la plus-value environnementale des différents types de symbioses. Il ne s'agit cependant plus d'une analyse de faisabilité, la question environnementale étant légalement non contraignante, mise à part dans le cadre du respect des normes légales. Cette situation pourrait néanmoins changer si les objectifs du protocole de Kyoto devenaient un jour contraignants. Les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre pourraient alors être répartis par entité économique et les atteindre deviendrait une contrainte légale.

Nous parlerons donc ici plutôt de « pertinence environnementale ». Le terme de pertinence a été préféré au terme efficacité pour ne pas introduire de confusion avec le concept d'éco-efficacité. Une solution jugée pertinente doit avoir une influence positive sur les deux éléments précités : les impacts et les risques. Les procédés industriels et les filières existantes d'approvisionnement, de collecte, et de valorisation des différents flux sur le territoire sont utilisés comme scénario de base pour déterminer la pertinence de la nouvelle solution. Il va de soi qu'une ACV complète serait nécessaire dans chaque cas pour quantifier les impacts et comparer les scénarios. Celle-ci devrait être couplée à une analyse de potentiel de réduction des risques industriels, principalement en ce qui concerne l'organisation logistique des filières. L'objectif de cette recherche n'est pas de proposer une ACV complète pour chaque symbiose potentielle détectée par le coordinateur ou un acteur économique. Le travail serait énorme et reviendrait en fin de compte à réaliser une ACV de l'ensemble du système industriel considéré. La pertinence environnementale est ici discutée de manière générale en énonçant et en discutant les paramètres pouvant être influencés par une nouvelle solution basée sur des symbioses industrielles.

Les étapes du cycle de vie d'une ressource dont le cheminement est modifié par la mise en place d'une symbiose industrielle ont été décrites dans la Section 2.3 (Figure 31). Les changements induits peuvent avoir des effets directs et indirects sur le système industriel. Le Tableau 8 liste les paramètres d'analyse de la pertinence environnementale pour l'utilisation et le transport des flux de matière et d'énergie. Ceux-ci ne sont pas aisément quantifiables sans la réalisation d'une ACV complète. Dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région, deux éléments principaux ont été retenus pour évaluer la pertinence environnementale d'une opportunité.

Premièrement, la hiérarchie des déchets permet de caractériser l'efficacité du devenir d'un déchet selon les grands principes de classification de l'efficacité des procédés et des filières de traitement. Les définitions des options disponibles ont été discutées dans la Section 1.4.3.2. En ce qui concerne la

pertinence environnementale, il est nécessaire de décrire en détail le niveau technologique des procédés de valorisation existant, particulièrement dans les cas de recyclage et de sous-cyclage. Cette dernière solution est généralement considérée comme moins efficace que le recyclage car il ne permet pas un usage cyclique de la ressource à 100%. Le sous-cyclage permet une réutilisation indirecte pour une autre utilisation, handicapant ainsi souvent ses chances d'être réellement réutilisé ou recyclé. De plus, il augmente le risque de diffusion de polluant dans l'environnement. Son utilisation en Suisse est fortement contrôlée (Section 2.4.2.3). Ainsi, il est difficile d'évaluer si la synergie présente réellement une plus value environnementale par rapport à une filière de recyclage ou de réutilisation. Cependant, nous verrons que pour de nombreuses synergies considérées comme du sous-cyclage au sens de la hiérarchie des déchets, il n'existe pas réellement de filière de recyclage ou de réutilisation (Chapitre 4). La hiérarchie des déchets nécessite d'être discutée au cas par cas, en tenant compte des conditions locales.

Deuxièmement, une partie significative des impacts environnementaux liés à une activité économique provient des nombreux transferts de flux entre deux lieux géographiques. La globalisation de l'économie a multiplié les transports effectués dans le cadre de la production industrielle. De l'extraction d'une ressource à sa fin de vie, la distance parcourue peut se chiffrer en milliers, voir en dizaines de milliers de kilomètres. La consommation de ressources non renouvelables et les émissions de gaz à effet de serre rendent la prise en compte de la dimension spatiale du cheminement des ressources indispensable pour évaluer la pertinence d'une opportunité. Plusieurs travaux dans le domaine de l'écologie industrielle font d'ailleurs mention de la nécessité de relocaliser l'usage des ressources (Johansson, Kisch et al. 2005; Lyons 2007). S'il est difficile de définir une échelle locale, la substitution d'un combustible fossile importé par une ressource renouvelable endogène apparaît de prime abord comme une solution pertinente. Une synergie offre donc la possibilité d'éviter l'importation d'un flux en lui substituant une ressource endogène ou une matière première secondaire issue d'une autre entité présente dans un périmètre permettant de réduire les impacts des activités concernées. En ce qui concerne la valorisation, le devenir d'un déchet sera également caractérisé en fonction de sa destination : locale, régionale ou internationale. Les impacts liés aux transports vont alors en grandissant ²⁵. L'élément à retenir ici est l'introduction du concept de *compacité spatiale* de l'utilisation d'une ressource, et en particulier de sa filière de valorisation. Plus l'espace géographique dans lequel se déroule l'ensemble du cycle de vie de la ressource est restreint, plus les impacts environnementaux liés aux transports sont réduits. Cette notion ne doit pas être confondue avec la notion de *dispersion* des activités économiques dans un espace géographique donné.

La pertinence environnementale en fin de vie est donc le fruit d'un équilibre entre la technologie de valorisation disponible ou choisie et la distance devant être parcourue jusqu'au lieu de valorisation ou de réutilisation. Les questions qui se posent alors sont multiples. Est-il plus pertinent de valoriser énergétiquement un déchet produit à Genève dans les limites du canton ou de l'exporter en Espagne ou

²⁵ Certaines configurations géographiques et politiques peuvent néanmoins servir de contre-exemples. Dans le cas de Genève, en terme d'impacts dus aux transports, il est plus pertinent d'envoyer des ressources en France voisine (par exemple dans l'agglomération franco-valdo-genevoise) que à Bâle.

en Chine pour qu'il puisse être recyclé ? La Figure 35 exprime la relation entre l'efficacité du procédé de valorisation et la compacité spatiale de la filière de fin de vie dans le but de définir la pertinence de l'usage local des ressources. L'évolution des couleurs du rose au vert met en évidence l'importance de la réduction des impacts sur l'environnement. La double flèche grise indique une zone d'incertitude. Une ACV est alors nécessaire pour confirmer ou infirmer le gain d'efficacité. Il va de soi que la réponse à cette question dépend également des quantités considérées et de la valeur financière du déchet.

2.4.4.1 Conclusion sur la pertinence environnementale

Il s'agit donc de mener une réflexion non chiffrée, mais basée sur les principes de l'analyse de cycle de vie, destinée à déterminer si une opportunité est pertinente ou non. Celle-ci permet une comparaison rapide de plusieurs scénarii en se basant sur les changements de procédés, la substitution de matières premières ou de produits manufacturés neufs, la technologie de valorisation en fin de vie et l'évaluation des distances parcourues. Même en réalisant cette balance des intérêts, le bénéfice environnemental d'une symbiose n'est pas toujours aisément quantifiable et l'amélioration environnementale n'est pas toujours clairement identifiable.

Il revient au coordinateur d'effectuer une première analyse afin d'évaluer les cas dans lesquels la réduction des impacts environnementaux et des tonnes-kilomètres parcourues est manifeste. C'est à lui qu'il revient d'évaluer s'il est judicieux d'aller de l'avant. De la même manière, certaines opportunités résultent en une augmentation des impacts ou des distances parcourues. L'augmentation des impacts environnementaux étant considérée comme un élément éliminatoire, il convient alors d'éliminer l'option considérée. Cependant, lorsque ses connaissances et son objectivité lui indiquent qu'un doute existe, il peut faire appel aux institutions académiques ou des experts du secteur privé pour réaliser une analyse de cycle de vie partielle ou complète.

Deux éléments pouvant relativiser l'évaluation de la réduction des impacts environnementaux et des risques industriels d'une symbiose doivent être mentionnés ici. Premièrement, il est particulièrement important de tenir compte d'éventuels effets rebonds qui n'aurait pas été identifié en première analyse. Deuxièmement, l'analyse de la pertinence environnementale d'une symbiose doit être mise en balance avec les possibilités d'optimisation des procédés et d'intégration des procédés au sein de l'entreprise, et ce afin de ne pas figer un système de production qui pourrait être amélioré par des développements technologiques. Ces éléments ont été définis et discutés dans le Chapitre 1.

Tableau 8 : Facteurs de réduction des impacts sur l'environnement des symbioses industrielles. Source : auteur.

Extraction et transformation de ressources		
Effets directs		Pertinent si
<i>Energie</i>	Economie de vecteur énergétique générée par la substitution de la matière première (symbiose)	> 0
	Gain d'efficacité énergétique généré par le partage d'infrastructures (mutualisation)	> 0
<i>Eau</i>	Quantité d'eau souterraine ou de surface non extraite (symbiose, mutualisation)	> 0
	Quantité d'eau potable non consommée (symbiose, mutualisation)	> 0
<i>Matière</i>	Quantité de matière non extraite et transformée (symbiose, mutualisation)	> 0
<i>Transport</i>	t.km non parcourues (symbiose, mutualisation)	> 0
Effets indirects		Pertinent si
<i>Général</i>	Réduction des émissions dues aux activités d'extraction et de transformation	> 0
	Diminution des émissions dues aux importations de matière première	> 0
Prise en charge et valorisation en fin de vie		
Effets directs		Pertinent si
<i>Energie</i>	Economie d'énergie générée par la suppression de procédés de traitement ou de recyclage (symbiose)	> 0
<i>Eau</i>	Quantité d'effluents industriels détournés des installations de traitement (symbiose, mutualisation)	> 0
<i>Matière</i>	Réduction de la production de déchets solides non réutilisés (mis en décharge DCB, DCMI, incinération, recyclage)	> 0
<i>Transport</i>	t.km non parcourues	> 0
Effets indirects		Pertinent si
<i>Globaux</i>	Réduction des émissions dues aux activités de traitement / valorisation (entre autres émissions de CO ₂ , SO ₂ , ..., dans l'atmosphère)	> 0
	Diminution des émissions dues aux exportations de déchets en vue de la valorisation	> 0

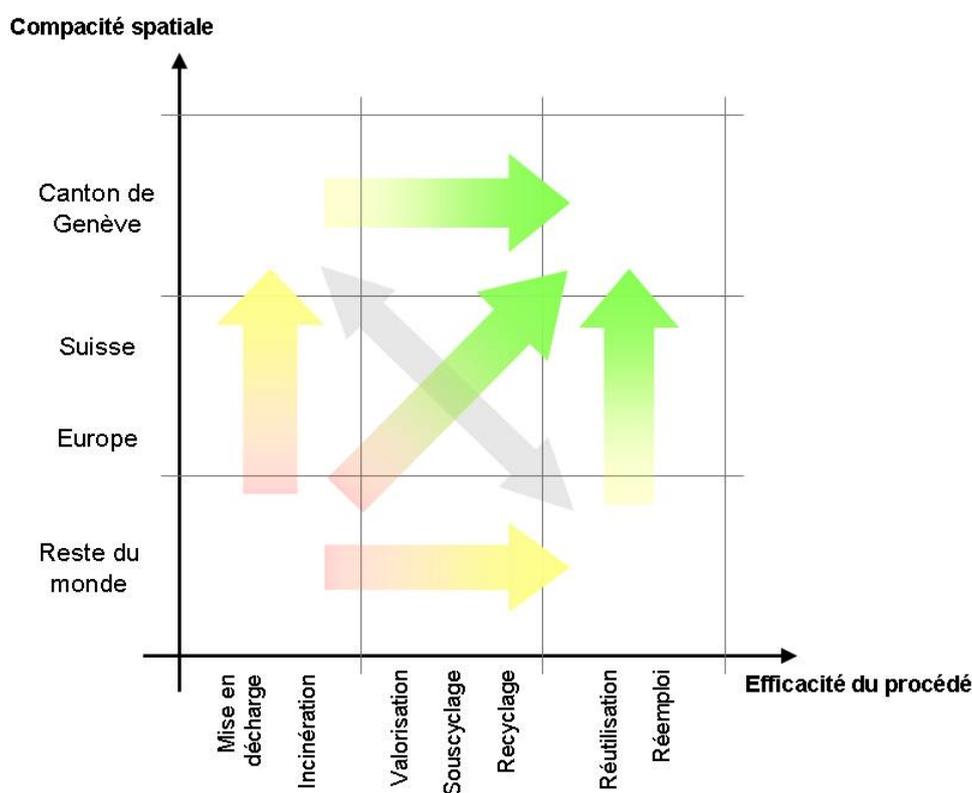


Figure 35 : Pertinence environnementale d'une filière de valorisation en fonction de l'efficacité du procédé (selon la hiérarchie des déchets) et de la compacité spatiale de la valorisation d'un flux. Source : auteur, selon (Bengoa 2007).

2.4.5 Réflexions sur la faisabilité globale d'une symbiose industrielle

Les quatre paramètres de faisabilité et de pertinence considérés individuellement ne permettent pas de conclure sur la faisabilité globale d'une opportunité. Par exemple, la pertinence environnementale, qui est le principal objectif des symbioses industrielles, est subordonnée aux trois contraintes techniques, légales et économiques. Une solution peut en effet être très avantageuse, mais ne correspondra par exemple pas aux exigences de qualité de l'entité utilisatrice. L'intérêt de la pertinence environnementale, dans les phases de réalisation d'un projet est de justifier du bien-fondé d'une solution. Elle sert d'ailleurs d'élément incitatif au même titre que l'analyse économique. Ainsi, une opportunité peut être pertinente au regard de l'environnement et au sein de la loi, mais irréalisable avec l'état de la technique actuelle. Au même titre, une synergie pertinente environnementalement et réalisable techniquement et au regard de la loi, mais ne présentant pas un bilan économique favorable malgré des subventions publiques, a peu de chance de voir le jour.

La Figure 36 illustre les effets de dépendance entre les quatre paramètres discutés dans les sections précédentes. La faisabilité légale influence évidemment les trois autres indicateurs. Si la législation peut être adaptée dans certains cas précis, la faisabilité légale reste une condition sine qua non. En deuxième lieu, la faisabilité technique influence le bilan économique et environnemental d'une synergie. Troisièmement, la faisabilité économique est subordonnée à la faisabilité technique, qui a la capacité de rendre un projet rentable ou irréalisable économiquement, à la faisabilité légale pour les coûts impliqués par le respect des dispositions légales, ainsi qu'à la pertinence environnementale dont dépendent les possibilités de subventions pour la mise en œuvre. Finalement, la pertinence environnementale est dépendante des choix techniques effectués et de la législation environnementale en vigueur. Il est également nécessaire de différencier l'utilisation souhaitable d'un flux, caractérisée par l'indicateur de pertinence environnementale, de ce qui est pratiquement réalisable décrit par les indicateurs de faisabilité économique, légale et technique.

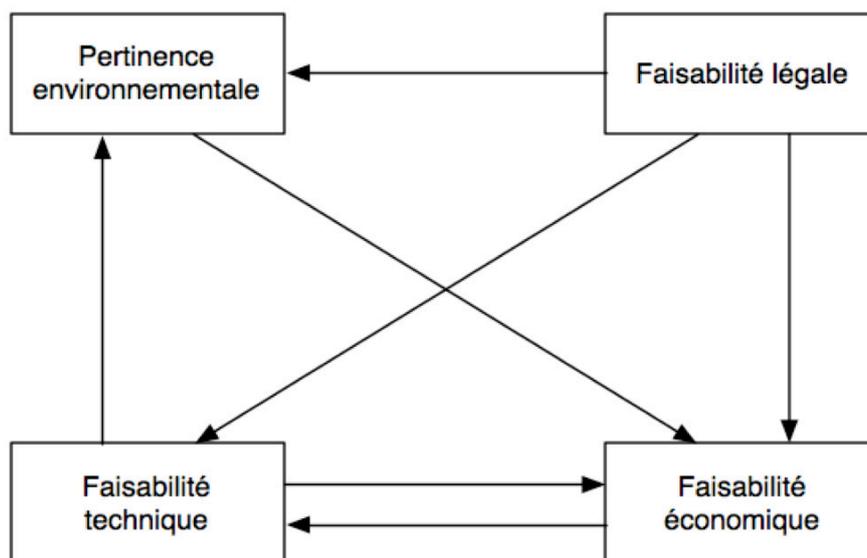


Figure 36 : Liens et dépendances entre les indicateurs de faisabilité technique, légale, économique et de pertinence environnementale. Source : auteur.

A la vue des éléments précédents, les quatre paramètres peuvent être agrégés en un seul définissant la faisabilité globale, mais sous certaines conditions énoncées sous la forme d'éléments éliminatoires dans les sections précédentes. Il s'agit de contraintes empêchant de facto la réalisation d'une synergie. Chaque indicateur implique au minimum un élément éliminatoire, mais celui-ci peut ensuite se décliner de plusieurs manières.

Premièrement, une synergie peut être non-réalisable compte tenu de l'état des connaissances techniques. Si les avancées techniques actuelles permettent beaucoup de choses, certains procédés de purification et de transformation de la matière restent pour l'instant impossible à mettre en œuvre.

Deuxièmement, les lois sont destinées à protéger l'environnement. La législation interdit l'utilisation de certaines substances et certaines filières de fin de vie. Elle fixe également les règles d'utilisation de nombreuses autres substances pour éviter leur diffusion dans l'environnement. Une interdiction légale nominative ou non d'une filière de valorisation d'une substance est un élément éliminatoire. Une interdiction légale, comme celle de la dilution (OTD 1990), par exemple, handicape la réalisation d'une synergie. Cette interdiction est, la plupart du temps, pleinement justifiée et sert à empêcher la diffusion de substances polluantes dans l'environnement. De plus, la législation environnementale offre en général une bonne protection concernant les substances dont la diffusion et la transformation dans les différents compartiments de l'environnement est bien connue.

Troisièmement, la rentabilité d'une solution. L'absence de marge bénéficiaire et un retour sur investissement trop long pour les acteurs économiques constituent des éléments éliminatoires. Cette situation concerne en particulier les produits résiduels, dont la valeur sur le marché est très faible, voir négative et les flux dont l'adaptation qualitative est trop coûteuse. Si la synergie proposée implique une augmentation des coûts pour l'entreprise, sans perspective d'un retour sur investissement (financier ou non) dans des délais raisonnables, celle-ci n'a aucune chance de voir le jour.

Quatrièmement, la synergie se traduit par une augmentation des impacts environnementaux. Certaines solutions techniquement réalisables et économiquement rentables peuvent aboutir à une augmentation des impacts environnementaux par rapport à la situation initiale. Si ces solutions peuvent parfois intéresser les entités économiques, il est nécessaire de communiquer sur les impacts négatifs de la solution afin d'éviter sa mise en œuvre.

Les bases du système d'indicateurs développé à partir de ces quatre paramètres sont consultables en Annexe 2. Faute de temps, sa robustesse et sa précision n'ont pas pu être éprouvées dans le cadre de cette recherche et il n'est pas présenté dans le corps de texte principal.

2.5 PROCEDURES POUR LA MISE EN ŒUVRE SUR LE TERRAIN

La revue de littérature a permis d'énoncer plusieurs conclusions sur la manière dont sont mis en place actuellement la plupart des projets de symbioses industrielles. Il est nécessaire de comprendre les mécanismes énoncés à la Section 2.2.1 afin de surmonter les barrières sociales, techniques et économiques, et de convaincre les entreprises de leur bien fondé. L'origine de l'initiative, publique ou privée, apparaît entre autres comme un élément déclencheur important. En effet, lorsqu'elle est d'origine privée et donc sous la responsabilité d'un ou de plusieurs acteurs économiques, il est logique de présumer que ceux-ci savent comment mettre en œuvre un projet qui correspond à leurs propres attentes et intérêts. Au sein d'une entreprise, une barrière importante à l'optimisation environnementale semble se trouver dans les différences d'objectifs entre l'organe de l'entreprise en charge de la gestion environnementale et celui de gestion stratégique et financière.

Il apparaît donc nécessaire d'appuyer et d'aider les choix technologiques liés à la mise en place des collaborations, les entreprises elles-mêmes ayant souvent très peu, voir pas du tout de ressources à consacrer à l'étude de telles opportunités. De plus, la méthodologie d'audit développée à la section précédente n'apporte que peu de résultats si elle est appliquée à une seule entreprise ou à plusieurs sans établir de liens de communication entre elles. Si nous considérons le problème sous un autre angle, il est intéressant d'évaluer quels sont les leviers dont dispose une administration publique désireuse d'optimiser la consommation de ressources sur son territoire et les moyens dont elle dispose pour motiver les entités économiques à la suivre dans cette voie.

Cette section propose deux procédures de terrain destinées à une administration publique, ou à un organe de gestion d'une zone industrielle, souhaitant initier un projet de symbioses industrielles. Le projet pilote de Genève dont la première phase s'est déroulée entre 2004 et 2006 a utilisé une méthodologie développée par Cyril Adoue (Adoue 2004; 2007). La procédure de terrain utilisée a été adaptée selon les enseignements tirés de sa première application, en fonction des besoins identifiés lors des phases ultérieures du projet de Genève (2007 à 2009) et de la mise en place du projet pilote du canton de Vaud (2007 à 2008). Les procédures détaillées dans les études de cas dans ce travail constituent les versions les plus récentes utilisées sur le terrain.

La première est dite « systématique et exploratoire » : elle implique la connaissance de l'ensemble des flux entrants et sortants des entreprises considérées grâce à la méthodologie d'audit développée dans la Section 2.3.2. Gérée par un coordinateur de type *facilitateur*, elle requière la gestion d'une grande quantité de données, ce qui nécessite le recours à un outil de gestion de base de donnée (Chapitre 3) pour le traitement des données issues des audits. Cette procédure s'est révélée efficace mais très gourmande en temps pour les entreprises et le coordinateur, principalement à cause de l'importante quantité de données à communiquer et à traiter. En réponse à ces préoccupations, qui revêtent une importance plus ou moins

grande en fonction des aspects cognitifs, culturels et structurels du territoire considéré, une deuxième procédure a été développée à Genève dès 2007. Le coordinateur garde son rôle de *facilitateur* mais sans recourir à l'audit dans les premières phases du projet. La détection de symbioses industrielles et les premières discussions se font dans le cadre de rencontres entre acteurs économiques, en présence d'experts. Elle permet d'évaluer les motivations et de détecter des plus forts potentiels en impliquant directement les représentants des entreprises dans les discussions.

2.5.1 Procédure 1 : Création d'un réseau et réalisation d'audits pour la détection systématique et la mise en œuvre de symbioses industrielles

La mise en place d'une dynamique de collaboration impliquant plusieurs acteurs économiques ainsi que des représentants des pouvoirs publics requière la création de liens de confiance. En amont de la procédure de terrain dédiée spécifiquement aux symbioses industrielles il est nécessaire d'identifier le porteur de projet le plus adapté. Un représentant de l'administration publique motivé, ouvert à de nouvelles solutions et favorable à une approche proactive de la problématique environnementale, est un élément déclencheur important. L'histoire des mécanismes structurels, soit de la collaboration entre services publics et acteurs économiques, est également primordiale pour choisir qui va donner au coordinateur l'accès aux données dont dispose l'Etat et le soutenir dans ses contacts avec les entreprises. La forme utilisée consiste en la création d'un groupe de travail ou d'un comité de pilotage regroupant tous les services en lien avec les activités économiques du territoire. Le Chapitre 4 traitera de ces aspects dans le cas de Genève. Le coordinateur peut alors initier son travail de mise en réseau. La première procédure comporte 9 étapes (Figure 37), détaillées dans les sections suivantes.

2.5.1.1 Choix des acteurs économiques (étape 1.)

La première étape de tout projet consiste à sélectionner des partenaires potentiels. Une bonne connaissance de l'organisation du territoire permet de déterminer la localisation géographique des principales concentrations d'activité et des zones industrielles. Dans le cas des symbioses industrielles, les activités économiques les plus intéressantes sont les entreprises du secteur secondaire de grande taille possédant des activités de production. Le secteur tertiaire et les sièges sociaux du secteur secondaire représentent également un intérêt, mais pour certaines familles de flux uniquement.

Les pouvoirs publics possèdent en général des données permettant de comprendre l'organisation géographique des activités économiques, mais pas toujours de manière complète et intégrée. En Suisse, le registre du commerce constitue la source la plus fiable en termes de données mises à jour. Cependant, sous la forme mise à disposition pour le grand public, il n'indique ni le nombre d'employés, ni la position géographique exacte des unités locales. Au niveau cantonal, le degré de précision des données disponibles auprès des autorités cantonales varie. Mais dans tous les cas, la mise en place d'un projet est

facilitée par l'accès à des données comme la liste complète des entités économiques présentes sur le territoire, la description de leur activité, la classification selon le secteur d'activité (NOGA), le nombre d'employés, l'adresse de chaque unité locale et leurs coordonnées géographiques.

La rôle du coordinateur est d'utiliser ces données pour sélectionner un certain nombre d'entité identifiées comme étant les plus importantes consommatrices de ressources du territoire considéré. Il intègre également ses connaissances personnelles des symbioses industrielles et des bonnes pratiques à reproduire, ainsi que les recommandations de l'administration publique. Dans le cas de Genève, les entreprises ont été sélectionnées sur l'ensemble du territoire du canton.

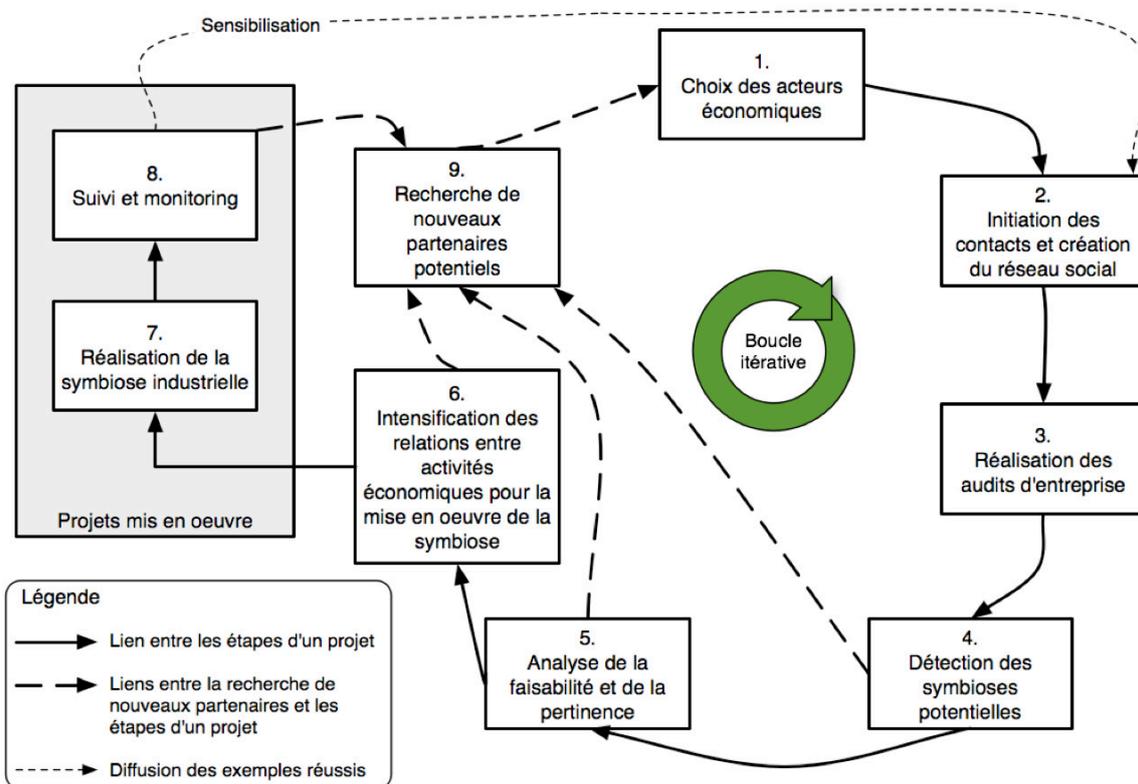


Figure 37 : Organigramme de projet présentant les neuf étapes de mise en œuvre de la procédure 1.

Source : auteur.

2.5.1.2 Initiation des contacts et création du réseau social (étape 2.)

Le coordinateur peut maintenant établir un premier contact avec les entités économiques sélectionnées. Pour cela, il a le choix entre deux approches. Dans certains cas, son nom ou celui de l'entité pour laquelle il travaille lui-même représente un gage suffisant pour lui ouvrir la porte des entreprises. Dans d'autres cas, les pouvoirs publics en charge du territoire considéré sont plus à même d'y parvenir, de par leurs expériences passées, de permettre au coordinateur d'accéder à l'entreprise. Bien que l'expérience de

terrain montre que les deux cas peuvent aboutir à des résultats positifs, un groupe de pilotage créé au sein de l'administration publique apparaît comme le meilleur soutien à la démarche dans le contexte politique et structurel suisse. Selon l'histoire du territoire considéré, le groupe de pilotage peut être une institution académique ou un organe faïtier regroupant des acteurs économiques.

Après avoir identifié un contact privilégié, un courrier est envoyé au libellé du service public ou de l'institution qui chapeaute le groupe de pilotage du projet. Le choix de la personne à contacter au sein d'une entreprise se porte le plus souvent sur le responsable qualité-sécurité-environnement (QSE), lorsqu'un tel poste existe. Pour une PME, le directeur ou le chef de la production sont également des personnes adaptées.

2.5.1.3 Réalisation des audits d'entreprise (étape 3.)

Après un premier contact téléphonique, le coordinateur se rend dans l'entreprise pour une rencontre avec les personnes en charge des questions d'environnement, de la production et des achats. Il est important que le coordinateur explique l'ensemble de la démarche aux représentants de l'entreprise avant sa visite, afin de leur permettre de se préparer. Une fois sur place, son objectif est de collecter des données sur les flux de matière et d'énergie avec un degré de précision maximum. Pour ce faire, il utilise la méthodologie d'audit définie à la Section 2.3

Lors de la première mise en œuvre de la procédure, un questionnaire pour la collecte du bilan de matières et d'énergie était envoyé en format électronique préalablement à la visite sur le terrain. Il s'est avéré que la taille imposante du questionnaire était décourageante pour l'entreprise qui, à ce stade, n'a pas encore pu rencontrer le coordinateur face à face. Lors des mises en œuvre suivantes de la procédure, le questionnaire, complété et partiellement modifié, n'a plus été envoyé au préalable. Par contre, le coordinateur l'amène avec lui et pose directement les questions lorsqu'il consulte les documents mis à disposition par l'entreprise et visite ses chaînes de production.

2.5.1.4 Détection des symbioses industrielles potentielles (étape 4.)

Si chaque entité économique considérée fournit des données exhaustives concernant ses flux de matière, eau et énergie, la quantité de données à traiter devient vite conséquente. Dans le cadre du projet pilote de Genève, utilisé comme étude de cas, plus de 1500 données de flux ont été récoltées entre 2005 et 2009 pour 31 entreprises. Chaque donnée est accompagnée de plusieurs champs décrivant ses caractéristiques techniques. L'ensemble des 26 champs définis dans la méthodologie d'audit est rarement complété, mais la quantité de donnée à traiter est néanmoins considérable. Le recours aux systèmes d'information et de gestion de bases de données se révèle indispensable pour leur stockage, leur mise à jour et leur traitement. Ces considérations sont le sujet central du Chapitre 3.

2.5.1.5 *Analyse de la faisabilité et de la pertinence (étape 5.)*

Le système d'information a permis de détecter des symbioses industrielles potentielles, en comparant les flux entrants et sortants des entreprises (Chapitre 3, Section 3.3.2). Le coordinateur doit maintenant évaluer quelles sont celles qui valent la peine d'être approfondies. Les paramètres techniques influençant la faisabilité et la pertinence d'une symbiose industrielle ont été décrits à la Section 2.4. Cette tâche nécessite des connaissances approfondies dans de nombreux domaines de l'environnement et de l'industrie. Dans certains cas, le coordinateur peut choisir de faire appel à des experts issus du milieu académique ou du secteur privé. Leurs connaissances et leur grande expérience dans le développement, l'évaluation et la mise en œuvre de nouvelles solutions et technologies en font des partenaires privilégiés. Une telle analyse de faisabilité pour chacune des opportunités découvertes dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne est proposée dans le Chapitre 4.

A ce stade, le projet regroupe donc l'administration publique, les institutions académiques, les activités économiques elles-mêmes et un ou plusieurs coordinateurs, issus d'organismes privés ou publics, autour de la problématique de la gestion des ressources. La confidentialité des données est garantie par le groupe de pilotage afin de renforcer le lien de confiance qui s'établit entre le coordinateur, le groupe de suivi et les acteurs économiques.

2.5.1.6 *Intensification des relations entre activités économiques pour la mise en œuvre de la symbiose (étape 6.)*

Suite aux analyses de faisabilité et de pertinence le coordinateur de projet rédige un rapport individuel destiné à chaque l'entreprise et personnalisé. Les objectifs du rapport sont de motiver l'entreprise concernée pour aller plus loin. Le document inclut des considérations destinées à sensibiliser ces décideurs à la problématique des ressources en attirant leur attention sur les risques liés à une trop grande dépendance à l'égard de celles qui ne sont pas renouvelables. Afin de sauvegarder la confidentialité des données, seules les symbioses industrielles potentielles impliquant l'entreprise considérée sont détaillées dans le rapport. Le nom du ou des partenaires potentiels peut être gardé secret avant qu'un lien de confiance suffisant soit établi entre les partenaires. Lorsque celui-ci est établi, le nom peut être divulgué.

La partie « mise en place » commence réellement à cette étape. Le rôle du coordinateur se rapproche alors de celui d'un *facilitateur de réseau*. Il développe les contacts entre les acteurs économiques et avec les partenaires privés et académiques afin de permettre l'émergence rapide de solutions adaptées et optimales. Les partenaires doivent se rencontrer à plusieurs reprises, en présence ou non du coordinateur. Les réunions multipartites peuvent inclure, si nécessaire, un ou plusieurs représentants de l'administration ou des institutions académiques invité pour apporter leur expérience et dans certains cas, les ressources de l'Etat. Ces services sont conviés en fonction de la thématique abordée.

2.5.1.7 *Réalisation de la symbiose industrielle (étape 7.)*

Les opportunités ayant suscité l'intérêt des acteurs économiques doivent maintenant se concrétiser. A ce stade, le rôle du coordinateur est crucial. Il doit faire comprendre aux entreprises qu'elles ont à présent toutes les cartes en main pour réussir la mise en place d'une collaboration. Comme nous le verrons dans le cas de Genève, l'Etat a cependant accepté à plusieurs reprises d'aider les entreprises à financer des études de faisabilité et de viabilité approfondies. Dans d'autres cas, il est possible que l'Etat devienne lui-même ou fasse appel à un intermédiaire ou à un tiers opérateur pour s'occuper de la construction et de l'opération des installations. Toutefois, à partir de ce stade, le coordinateur doit inciter les entreprises à s'approprier le projet. L'objectif du coordinateur ou de son mandataire n'est pas de contraindre les entreprises à changer leur manière de fonctionner, mais plutôt de les accompagner dans le changement.

En toute logique, le rôle du coordinateur s'arrête lorsque la mise en œuvre commence, les modalités de réalisation étant du ressort des entreprises. Il arrive cependant que les entreprises fassent appel au coordinateur pour suivre les avancées de la réalisation. Il revient alors à celui-ci de décider jusqu'à quel point il peut s'investir avec l'entreprise, sachant que son rôle principal consiste à créer une dynamique de collaboration et non de devenir chef de projet pour une entité économique du secteur privé (ce qui serait le rôle d'un tiers opérateur).

C'est à partir de cette étape qu'il est réellement possible d'évaluer la motivation d'une entreprise. L'expérience a montré que dans de nombreux cas, l'entreprise est intéressée à écouter et à apprendre, mais, et c'est d'autant plus le cas en période de crise, reste prudente quand il s'agit d'investir ou d'accroître sa dépendance à un fournisseur en particulier. Ainsi, certaines opportunités ne se concrétisent pas toujours directement ou pas du tout. Il existe certains cas où le projet peut se réaliser beaucoup plus tard, en dehors de la dynamique créée par le projet, lorsque les conditions sont plus favorables pour l'entreprise.

2.5.1.8 *Suivi et monitoring (étape 8.)*

La Section 2.2.2 a mis en évidence le besoin croissant d'indicateurs pour suivre l'évolution du territoire et de ses activités économiques. Dans le cas de projets financés par les pouvoirs publics, il est primordial de disposer d'un système de suivi de l'impact des projets concrétisés. Les projets réalisés sont analysés sur la base du principe d'éco-efficacité. Les gains économiques générés pour les entreprises partenaires de la collaboration sont évalués, ainsi que la réduction (ou l'augmentation) des impacts environnementaux et la diminution de consommation des ressources.

Les projets non aboutis sont évalués selon les mêmes critères, mais en ajoutant des considérations sur la faisabilité technique et légale, afin d'identifier les barrières rencontrées. Il est intéressant de détailler les raisons de l'échec de certaines solutions qui apparaissaient comme viables selon les critères de faisabilité et de pertinence. Dans certains cas, l'analyse de l'influence des aspects cognitifs et culturels sur le

territoire considéré permet d'éviter de reproduire cette situation et renseigne sur les actions à entreprendre par le groupe de pilotage pour renforcer les liens et la collaboration. En d'autres termes, la prise en compte des liens existants entre certains acteurs économiques doit être pris en considération lors du choix des entreprises (étapes 1.) afin d'augmenter les chances de succès.

Les symbioses industrielles mises en œuvre, de la même manière que celles pré-existant sur un territoire, peuvent être utilisées pour sensibiliser d'autres acteurs économiques. Elles représentent un élément déclencheur important permettant d'étendre le réseau, d'une part en mettant en évidence de nouveaux acteurs économiques et en servant d'élément déclencheur pour les inciter à s'engager dans un projet.

2.5.1.9 Recherche de nouveaux partenaires potentiels (étape 9.)

À plusieurs étapes du déroulement du projet (Figure 37), les contraintes techniques, légales, économiques ou environnementales liées aux opportunités détectées font qu'une ou plusieurs des entités économiques associées à un projet renoncent. Il apparaît dès lors nécessaire de trouver de nouveaux partenaires dont l'activité ou la position géographique permet d'accroître le taux de succès des projets. De la même manière, les efforts liés à la réalisation d'une symbiose peuvent dans certains cas mettre en lumière des infrastructures ou des activités économiques du territoire susceptibles d'intégrer le projet ou présentant un potentiel intéressant.

L'identification de nouveaux partenaires est donc essentiellement le travail du coordinateur qui voit apparaître de nouvelles opportunités. Elles proviennent soit des actions de terrain, soit de l'utilisation du système d'information dont il dispose (voir Section 3.3.4). Cette tâche est importante mais très gourmande en temps. Créer un réseau peut nécessiter des années pendant lesquelles le groupe de pilotage et le financement du projet doivent être maintenus.

2.5.2 Procédure 2 : Réalisation d'ateliers thématiques pour une approche rapide et ciblée

La procédure 1 décrite ci-dessus peut être assimilée à une approche du type *facilitateur* telle que décrite dans la Section 2.2.1.2 et par Grant, Seager et al. (2010). Le coordinateur est le point central du projet en charge de diffuser l'information aux participants. Cette solution est pertinente dans les premières phases d'un projet, lorsque le coordinateur lui-même a besoin d'acquérir de l'information et des connaissances sur les activités du territoire. Lorsque le réseau s'étend, il est possible de travailler autrement, d'alléger son rôle et de permettre au réseau de se développer par lui-même. Le rôle du coordinateur est plus proche du *facilitateur de réseau* favorisant et gérant les interactions directes entre acteurs économiques dans le cadre de rencontres et d'ateliers thématiques impliquant plusieurs experts. La deuxième procédure proposée a pour objectif principal de permettre une détection rapide et ciblée des opportunités en présence des acteurs privés. Elle permet premièrement de créer directement le contact entre les

industriels, et deuxièmement de ne pas leur demander trop de temps dans les premières phases d'un projet. Elle implique cependant que le ou les coordinateurs et animateurs de ces ateliers possèdent des connaissances approfondies des possibilités de symbioses industrielles sur le territoire considéré : bonnes pratiques existantes, expériences en cours, revue de littérature sur les symbioses industrielles et innovation technologique. Le rôle de coordinateur est donc plutôt destiné à des personnes possédant plusieurs années d'expérience professionnelle. Son rôle prend alors encore plus d'importance, ce qui accroît le risque de rendre la dynamique uniquement dépendante de son travail.

Plusieurs étapes sont similaires à celles détaillées pour la procédure 1. Il s'agit de l'audit, de l'analyse de faisabilité, l'intensification des relations entre activités économiques pour la mise en œuvre de la symbiose et des étapes de réalisation. Le rôle du coordinateur reste celui d'un facilitateur actif sur le terrain. Les étapes qui présentent une différence marquée sont détaillées dans les sections suivantes. Il s'agit de l'analyse préliminaire du territoire, de l'initiation des contacts et de la création du réseau et la réalisation d'ateliers thématiques avant de réaliser des audits. La principale différence provient de l'expérience même du coordinateur. En analysant préalablement le territoire et en possédant des connaissances approfondies des potentiels de collaboration, il peut alléger la procédure. Ne pas réaliser systématiquement un audit des entreprises simplifie le travail du coordinateur et ses relations avec les entreprises dans les premières phases du projet. Réaliser des ateliers thématiques préalablement aux audits permet de se concentrer sur quelques opportunités à fort potentiel qui auront un impact important pour motiver les autres acteurs. A moyen terme, cette solution accroît le risque de passer à côté de synergies intéressantes, mais difficiles à détecter au premier abord.

2.5.2.1 Identification et analyse des principales concentrations d'activités économiques (étape 1.)

En comparaison avec la procédure 1, le coordinateur doit posséder une connaissance du territoire concerné encore meilleure. En amont du projet, la compréhension des mécanismes politiques (législation, politiques publiques) et structurels (dynamique de collaboration entre organismes publics et privés) va le soutenir dans ses démarches. Mais il n'est plus suffisant ici d'identifier un porteur de projet et des entreprises intéressantes. La préparation inclut une analyse approfondie des entreprises existantes, des principaux secteurs d'activité, de leur diffusion géographique, ainsi que des filières existantes de valorisation des co-produits (collecteurs de déchets, recycleurs, technologies de valorisation présentes sur le territoire). Il est ainsi possible d'identifier les zones industrielles, les clusters d'entreprises présentant une concentration importante et les organes et associations actifs au sein de ceux-ci. Cette analyse préliminaire peut être réalisée en amont du projet, en recourant aux données spatiales disponibles et en les analysant dans un système d'information géographique (Chapitre 3).

Cette étape acquiert une importance particulière lorsque le coordinateur souhaite travailler comme facilitateur de réseau et réaliser des ateliers thématiques. Il semble pertinent de s'appuyer sur les

collaborations existantes pour accélérer la diffusion de l'information et la création des liens de confiance. Dans ce cas, il est en effet préférable de travailler sur des zones industrielles à forte concentration d'activités secondaires afin de maximiser les potentialités.

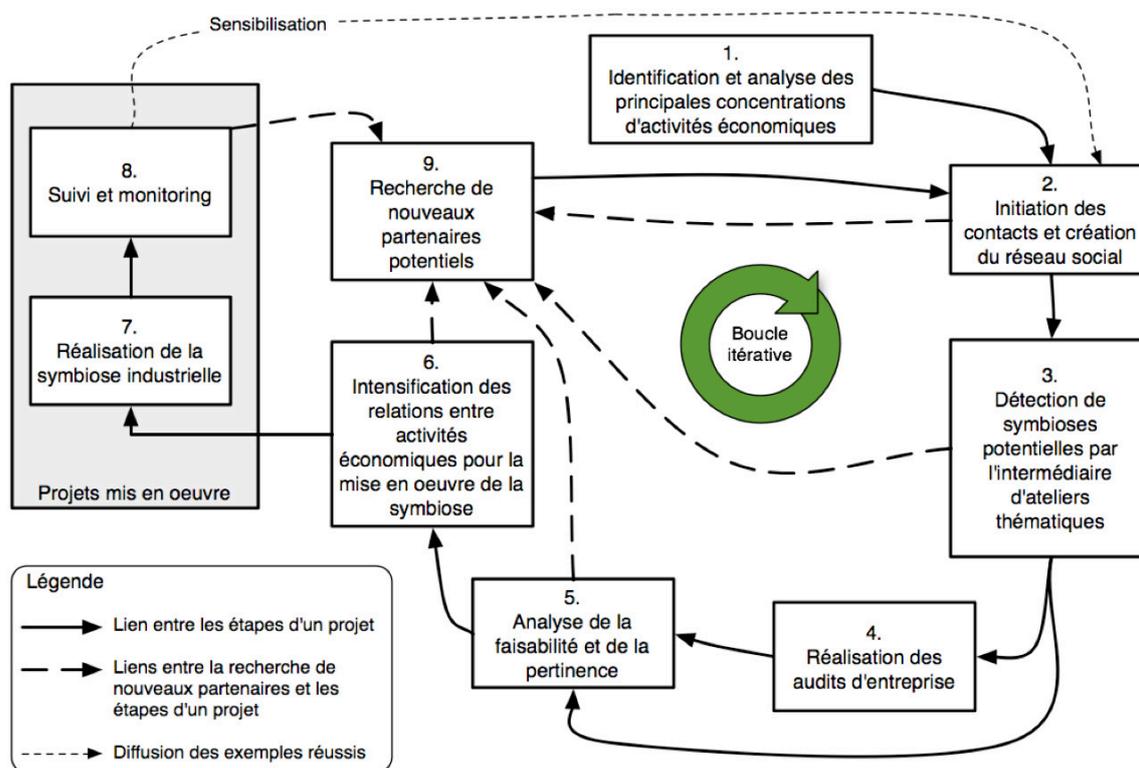


Figure 38 : Organigramme de projet présentant les neuf étapes de la procédure 2. Source : auteur.

2.5.2.2 Initiation des contacts et création du réseau social (étape 2.)

Le coordinateur doit maintenant établir un premier contact avec les entités économiques de la ou les zones sélectionnées. A nouveau, il a le choix d'utiliser son nom ou celui l'entité pour laquelle il travaille lui-même, ou il peut juger que d'autres groupements de personnes peuvent l'aider. Il ne s'agit pas seulement des pouvoirs publics, mais également des associations d'entreprises, ou de branches de l'industrie et des chambres de commerce et d'industrie, identifiées à l'étape précédente.

Les premiers contacts à initier concernent cette fois-ci les associations actives sur le territoire et les zones industrielles et non directement les entreprises. Si le coordinateur parvient à les intéresser et à les faire s'investir dans le projet, les portes des entreprises ne s'en ouvriront que plus facilement. Une fois le ou les bons acteurs identifiés et incorporés au projet, le contact avec la direction et les responsables environnement des entreprises est établi directement par l'intermédiaire d'une invitation à un atelier thématique. Elle est rédigée par le groupe de suivi et d'une ou plusieurs associations soutenant le projet.

2.5.2.3 *Détection de symbioses potentielles par l'intermédiaire d'ateliers thématiques*

Les rencontres entre acteurs économiques ont plusieurs objectifs. Le premier concerne la sensibilisation à la problématique de la gestion des ressources. Ensuite, l'atelier a pour but de faire parler les entreprises sur leur gestion des ressources et les problèmes rencontrés. La discussion et l'échange d'expériences, en présence d'experts leurs permettent d'augmenter leur degré de connaissance dans les domaines concernés. Sur cette base, le rôle des experts est de mettre en lumière des opportunités de symbioses industrielles sans avoir recours dans un premier temps à l'audit de l'entreprise. Il s'agit donc d'une part de faciliter la reproduction des bonnes pratiques détectées ailleurs dans le pays et dans le monde en suggérant aux acteurs économiques présents de réfléchir à certains flux spécifiques et, d'autre part, de favoriser la communication entre les entités économiques du territoire considéré afin de reproduire les expériences réussies au niveau local. La détection de symbioses industrielles est ainsi réalisée directement en présence de l'ensemble des acteurs économiques participants. L'atelier permet de sélectionner les actions à entreprendre en priorité en fonction de l'intérêt des entreprises et des discussions des contraintes techniques et économiques.

Pour capter l'attention et l'intérêt des représentants des entreprises, dont le temps est précieux, la durée de l'atelier est limitée à une demi-journée et peut éventuellement être suivi d'un repas destiné à favoriser les rencontres et le réseautage. L'atelier comporte deux parties. La première consiste en un petit nombre de courtes présentations proposées par le coordinateur et les experts externes présents. Elles traitent bien entendu de la gestion des ressources et sont destinées à intéresser les acteurs économiques à cette problématique et à leur faire comprendre l'intérêt pour leurs activités.

La deuxième partie consiste en une réflexion par groupe sur les solutions d'optimisation. Les thématiques proposées peuvent varier en fonction des secteurs d'activité représentés. Les groupes de travail sont organisés pour permettre aux industriels d'échanger leurs impressions sur les éléments présentés et de définir entre eux des priorités d'action pour leurs entreprises. Les discussions par groupe permettent de détecter les flux sur lesquels il faudrait agir en priorité et de raffermir les liens entre industriels. Chaque atelier est animé par des experts du domaine concerné, issus d'organismes publics et privés, et dispose d'un rapporteur pour la collecte des idées. Dans le cas d'une majorité d'acteurs du secteur secondaire, les sujets proposés sont : les échanges de matières et d'eau, la mutualisation ou gestion commune de l'approvisionnement et des déchets, ainsi que l'optimisation énergétique. Dans certains cas, les associations actives sur le territoire ou la ZI peuvent se faire le relais des préoccupations des acteurs économiques. Cela permet de proposer des thématiques adaptées à leurs attentes.

Les échanges de matières et d'eau : La première étape consiste à créer des liens entre industriels voisins afin de permettre l'échange d'informations. La discussion est encadrée par des professionnels afin de situer rapidement les enjeux précis : coûts de traitement très élevés de certains flux sortants, difficulté

pour trouver d'autres débouchés, coûts d'approvisionnement élevés pour de petites quantités, etc. A partir de là, le coordinateur et les experts font part de leur expérience en proposant des solutions d'optimisation.

La mutualisation d'approvisionnement et de traitement : En Suisse, l'organisation de la gestion des déchets des entreprises en marché libre complexifie la tâche des entreprises, qui peinent parfois à identifier le recycleur le plus adapté à leur situation. L'amélioration et la mutualisation du système de collecte des déchets au sein d'une zone ou d'un groupe d'entreprises est une opportunité souvent perçue positivement par les acteurs économiques. Cet atelier discutera des possibilités de création d'espaces communs pour la gestion des ressources et en particulier la collecte des déchets, ainsi que des motivations à établir des contrats communs pour l'approvisionnement et la collecte, permettant des économies d'échelle.

L'optimisation énergétique : la problématique énergétique se trouve aujourd'hui au cœur des préoccupations des entreprises et de l'administration publique. Cet atelier permet aux industriels de faire part de leurs difficultés en termes de gestion énergétique. Il a ainsi pour objectif d'informer les acteurs présents sur les politiques publiques dans le domaine de l'énergie et sur les ressources endogènes renouvelables disponibles sur le territoire. Dans un deuxième temps, il permet d'identifier des potentiels de substitution des vecteurs énergétiques fossiles, d'optimisation énergétique des procédés industriels ou des infrastructures, et de proposer des pistes pour la valorisation des rejets thermiques.

Les experts entourant le coordinateur de projet sont présents pour offrir leur expérience, proposer des solutions et guider les acteurs vers les différents programmes proposés par les pouvoirs publics. Il relève également les pistes intéressantes afin de pouvoir fournir un retour aux entreprises présentes après l'atelier et faciliter les étapes d'analyse et de mise en œuvre.

Cette procédure a été appliquée dans le cadre de l'étude cas de Genève. En 2007, un atelier d'écologie industrielle a été organisé dans la zone industrielle de Plan-les-Ouates, située au sud-ouest du territoire. Plusieurs entités économiques déjà impliquées dans les projets du groupe de travail Ecosite étaient présents ; une dizaine d'autres ont également pris part à la journée de discussions et de recherche d'opportunité. Les résultats sont décrits dans la section suivante.

2.6 APPLICATION AUX PROJETS PILOTES DE GENEVE ET DE LAUSANNE REGION

Les développements réalisés dans ce chapitre sont fortement influencés par le contexte culturel et politique de la Suisse, qui eux-mêmes agissent sur les mécanismes cognitifs et structurels inhérents au milieu économique. Les procédures 1 et 2, dont l'objectif est de favoriser l'essor des symbioses industrielles doivent pouvoir être adaptées en fonction du territoire considéré. Si leurs principales composantes, comme la compréhension du système industriel et la nécessité de créer de nouveaux flux d'informations entre les entreprises pour stimuler la réflexion sur la gestion des ressources restent identiques, l'approche peut varier. Le coordinateur de terrain doit donc connaître en profondeur les coutumes du territoire sur lequel il va travailler.

L'application des procédures 1 et 2 aux projets pilotes de Genève et de Lausanne Région, utilisés ici comme études de cas, a permis d'éprouver les procédures proposées. Il s'agit en fait d'un processus itératif d'adaptation et d'amélioration, étant donné qu'elles ont été partiellement créées et modifiées au cours des projets. Cette section propose un retour d'expérience sur la pertinence des procédures développées. Ensuite, afin de mieux cerner pourquoi ces procédures proactives destinées à changer le cheminement des flux de matière et d'énergie se sont révélées adaptées dans certains cas et non dans d'autres, il est nécessaire de détailler la perception qu'ont les acteurs des symbioses industrielles. Les relations que nous avons entretenues avec les entreprises et les services de l'administration publique ont permis de comprendre les motivations, les intérêts et les doutes de chacun.

2.6.1 Etude de cas de Genève

Le groupe de travail Ecosite a confié en 2004 au bureau Systèmes Durables un mandat de détection de symbioses industrielles sur le territoire du canton de Genève. Cyril Adoue, son fondateur, a alors proposé une méthodologie de terrain proche de celle décrite dans ses recherches académiques (Adoue 2004; 2007). C'est sur la base de celle-ci et en utilisant les développements et les retours d'expérience sur le projet que la procédure 1 décrite à la Section 2.5.1 a atteint sa forme actuelle.

La première étape a consisté à choisir les acteurs économiques, puis à les contacter. Une lettre d'introduction co-signée par M. Chambaz (directeur général de l'Office de l'environnement, Département de la sécurité, de la police et de l'environnement et président du groupe de travail Ecosite) et M. Moschinger (directeur de la Fondation pour les terrains industriels de Genève) a été envoyée aux entités sélectionnées. La lettre précise que l'Etat de Genève s'engage à garantir la confidentialité des données collectées. Sur 40 entreprises contactées en 2005, 19 ont répondu positivement et accepté l'audit de leurs chaînes de production en vue de collecter des informations sur leur flux de matière et d'énergie. Le taux de réponse positive est de 47.5%, ce qui est satisfaisant. Un coupon réponse a toujours été envoyé avec

la lettre d'introduction ; néanmoins plus de 85% des réponses positives ont été obtenues après un entretien téléphonique direct avec le représentant de l'entreprise contacté préalablement par courrier. Ces chiffres confirment que le choix d'un interlocuteur privilégié au sein de l'entité économique est un élément important pour la réussite d'un projet. Le premier contact téléphonique l'est également. La plupart de nos interlocuteurs avaient bien reçu notre courrier, mais c'est au cours du premier contact téléphonique qu'ils se sont décidés à engager leur entreprise dans le projet.

Les 19 entreprises concernées ont été auditées selon la méthodologie proposée alors par Systèmes Durables. Celui-ci a remis en septembre 2005 au groupe de travail Ecosite un rapport présentant 17 pistes de symbioses industrielles (Adoue 2005). En février 2006, je suis devenu coordinateur du réseau sur mandat du groupe de travail, avec la charge de mettre en œuvre des solutions proposées et d'étendre le réseau.

Entre 2005 et 2009, 109 entreprises incluant les plus gros consommateurs de ressources du canton ont été approchées. La dispersion géographique des entreprises sélectionnées au début du projet s'est avérée trop grande pour permettre la mise en place de plusieurs symbioses industrielles en particulier pour les familles de flux *eau* et *vecteurs énergétiques* présentant des contraintes spatiales et géographiques. Les entreprises faisant alors partie du projet ne se situaient pas uniquement dans les zones industrielles, mais étaient réparties sur l'ensemble du territoire du canton. Plusieurs entreprises se situaient cependant dans une des zones industrielles (ZI) du canton : la zone industrielle de Plan-les-Ouates (ZIPLO). Cette ZI a servi de zone pilote pour développer et tester la procédure 2. Un atelier d'écologie industrielle a été organisé en avril 2007. 65 entreprises ont été contactées par l'intermédiaire de l'Association des Industriels de la ZIPLO (AZIPLO). 20 ont accepté de participer à l'atelier hébergé par un des principaux industriels de la zone. Le taux de participation a donc été de 31 %. La faiblesse de ce chiffre s'explique en partie par le grand nombre de petites entreprises (entre 2 et 20 employés) dont la consommation de ressource est faible. Lors d'une relance effectuée par téléphone, une majorité a déclaré ne pas consommer suffisamment de ressources pour se sentir réellement concerné. Sur les 20 entreprises présentes, 4 faisaient déjà partie du projet et avaient préalablement effectué un audit de leur chaîne de production. Suite à l'atelier, 12 des 16 entreprises nouvellement intégrées au projet ont également été auditées.

Ainsi, au premier semestre 2009, 31 entreprises avaient fait l'objet d'un audit des flux de matière et d'énergie. Une liste détaillée des entreprises et de leur secteur d'activité est proposée dans le Chapitre 4. Afin de généraliser les résultats obtenus, les entreprises sont caractérisées par leur code NOGA (section et division). Pour l'ensemble des entreprises concernées, le nombre de synergies potentielles est passé de 17 en 2005 à 29 en 2008. Elles ont été détectées grâce au logiciel Presteo et au savoir-faire du coordinateur. Elles ont toutes fait l'objet d'une analyse de faisabilité et de pertinence dont les résultats sont détaillés dans le Chapitre 4.

Les audits ont également permis de détecter des symbioses pré-existantes. Ces symbioses industrielles sont appelées ainsi car leur mise en place est antérieure ou indépendante du projet. En 2005, 7 synergies

pré-existantes ont été détectées entre les 19 acteurs. Un des deux partenaires est néanmoins parfois situé hors des limites cantonales. En 2009, pas moins de 20 symbioses industrielles pré-existantes avaient été identifiées. Certaines filières de traitement des déchets disposent de procédés et de débouchés qui s'approchent grandement de symbioses industrielles. Les collecteurs de déchet servent alors d'intermédiaires. Lorsque la filière aboutit à une réutilisation du flux, elle a été considérée comme une symbiose pré-existante. Elles sont toutes détaillées par famille de flux dans le Chapitre 4. Il en existe très probablement d'autres étant donné que seules les 109 entités consultées dans le cadre du projet, certains intermédiaires et quelques associations ont été questionnés à ce sujet.

En 2009, une seule symbiose avait été mise en place directement grâce au travail réalisé par le coordinateur sur le terrain. Les raisons sont multiples : la petite taille des entreprises, leur dispersion géographique sur le territoire, le temps nécessaire à la mise en œuvre, les effets de la crise économique. La principale cause reste l'analyse de faisabilité et de pertinence qui fait que la plupart des symbioses potentielles identifiées par Adoue, puis par les audits des entreprises ayant rejoint le projet dans la deuxième phase, ne sont en fait pas réalisables entre les entreprises considérées. Selon certains contacts récents avec les entreprises, des réflexions sont toujours en cours et de nouvelles symbioses industrielles pourraient émerger du réseau développé, indépendamment de l'intervention du coordinateur.

Le succès du projet est à chercher ailleurs. Il a permis de renforcer les concepts d'écologie industrielle et de symbioses industrielles dans les politiques publiques cantonales. Les services en charge de l'énergie, de la gestion des déchets et de l'eau intègrent aujourd'hui cette question dans leurs travaux. L'intérêt des entreprises s'est avéré élevé pendant toute la durée du projet. La plupart ont déclaré avoir été intéressées par le projet. Plusieurs attendent néanmoins un engagement de l'Etat plus important pour financer la réalisation des projets, ce qui ne faisait pas partie des objectifs.

En conclusion, les procédures 1 et 2 se sont révélées adaptées et semblent avoir satisfait les entreprises et les pouvoirs publics. Elles ont par contre parfois fait doublon avec d'autres programmes de l'Etat, particulièrement dans le domaine de l'énergie, dans lequel l'administration mène une approche proactive depuis plusieurs années. Le coordinateur doit donc porter une attention particulière à lier son action avec les autres projets en cours sur le territoire, en favorisant les collaborations et une approche participative, plutôt que la concurrence entre services.

2.6.2 Etude de cas de Lausanne Région

Le cas du projet pilote de Lausanne Région est sensiblement différent. La procédure 1 a été appliquée entre 2006 et 2008. En octobre 2006, les Services Industriels de la ville de Lausanne (SIL) ont mandaté l'Institut de Politiques Territoriales et d'Environnement Humain (IPTEH) de l'Université de Lausanne (UNIL) pour mettre en œuvre un projet d'écologie industrielle sur le territoire de Lausanne Région.

Les SIL sont un prestataire de service (vecteurs énergétiques et eau) pour une partie du territoire considéré, mais pas son ensemble. Si la source de financement est publique, il nous a semblé difficile

d'utiliser l'entête d'un prestataire de service par crainte de l'émergence de conflits d'intérêts. Nous avons ainsi décidé que l'Université de Lausanne, en particulier le professeur Suren Erkman qui dirige le groupe d'écologie industrielle de l'IPTEH, remplirait le rôle de porteur de projet. L'ensemble de la communication a été assurée par l'IPTEH et les courriers ont été signés par le professeur Suren Erkman.

Les premières phases de la procédure 1 ont été réalisées par un travail d'étudiant de l'EPFL, suivi d'un travail de diplôme UNIL / EPFL, effectué par M. Baptiste Antille (Antille 2007). Celui-ci a tenu le rôle de coordinateur de projet, mais a été soutenu par l'IPTEH et moi-même. Les résultats de cette première phase ont été rendus en août 2007 sous la forme d'un rapport destiné aux SIL et intitulé « Détection de synergies éco-industrielles sur le territoire de Lausanne Région ». Ce rapport a mis en évidence un certain nombre de pistes de synergies, mais également les lacunes du projet après une période trop courte de quatre mois de travail. Les SIL ont ainsi mandaté l'IPTEH à l'automne 2007 afin d'approfondir la collecte de données et d'analyser les synergies potentielles. Finalement en mai 2008, 21 rapports individuels présentant les opportunités détectées ont été envoyés par l'IPTEH aux entités économiques du projet.

En 2007, 43 entreprises dispersées sur le territoire de Lausanne Région et dont l'activité et la taille semblaient adéquates ont été contactées. 21 ont accepté de participer au projet et de réaliser un audit de leur chaîne de production. Le taux de participation a été de 49%, soit un chiffre très proche de celui obtenu dans le cas de Genève. 11 symbioses potentielles ont été détectées à nouveau grâce au logiciel Presteo, dont l'IPTEH possède une licence académique. Sur les 11 flux concernés, 3 sont en réalité des potentiels de valorisation énergétique et 2 des potentiels de symbioses agro-industrielles. L'analyse de faisabilité et de pertinence est présentée au Chapitre 4.

Le projet a été interrompu en 2008 faute de financement. Aucune symbiose industrielle n'a pu être mise en place par le coordinateur de projet. Certaines pistes restent néanmoins intéressantes. Un nouveau projet a été initié au début de l'année 2010, impliquant de nouveaux partenaires de l'administration publique au sein d'un groupe de pilotage. Les participants sont issus en particulier du service en charge de la gestion des déchets industriels (Service des eaux, sols et assainissements, SESA) et du service de promotion économique (Service de l'économie, du logement et du tourisme, SELT).

2.6.3 Perception des pouvoirs publics

Les pouvoirs publics, à tous les niveaux institutionnels, sont les principaux acteurs du développement durable sur le territoire suisse. Les initiatives individuelles prises par les entités économiques sont très souvent indirectement influencées par les lois, les ordonnances, et les programmes d'aides publiques au financement. La majorité des projets en cours aujourd'hui en Suisse et dans le monde sont totalement ou partiellement financés par des organes publics internationaux, nationaux ou sub-nationaux (Section 2.2.1.1).

En Suisse, l'Etat sert de cadre institutionnel et juridique et joue principalement les rôles de facilitateur et de source de financement. Il finance, soit directement, soit par l'intermédiaire d'institutions académiques

et de bureaux de conseil privés, la coordination, la mise en place des réseaux de symbioses industrielles et les analyses de faisabilité. Il subventionne même dans certains cas la mise en œuvre. En ce qui concerne spécifiquement les procédures décrites dans ce chapitre, l'Etat peut jouer plusieurs rôles : financement de bureaux d'experts, utilisation de son influence pour motiver les entreprises à s'investir dans un projet, mise à disposition des ressources humaines de l'Etat. La tradition de collaboration et d'ouverture entre les secteurs publics et privés en Suisse est très ancienne. Le rôle structurant de l'Etat est perçu de manière positive et les liens structurels sont fréquents et intenses. Ainsi, le démarrage d'un nouveau projet comme les symbioses industrielles, s'il est présenté et soutenu par l'Etat, a beaucoup plus de chance d'intéresser les entités économiques que s'il est proposé directement par un consultant ou un groupement extérieur aux structures publiques.

Les études de cas de Genève et Vaud ont montré que l'administration cantonale perçoit les symbioses industrielles comme une opportunité. Elles s'inscrivent dans la volonté de diminuer la production de déchets et de valoriser les ressources de la manière la plus efficace possible afin de limiter les processus de diffusion. Dans le cas de Genève, l'élément moteur a été l'Agenda 21 cantonal, dont l'article 12, qui définit les démarches d'écologie industrielle est soutenu par le Service cantonal du développement durable et l'Office de l'environnement. Dans la région de Lausanne, le projet a été réalisé par l'Université de Lausanne à la demande d'un prestataire de service, certes public, mais qui n'est pas à proprement parler un organisme en charge des questions environnementales. Il s'agit cependant d'un projet pilote que les services de l'Etat de Vaud et de la Ville de Lausanne ont repris à leur compte en 2010.

Dans le cadre des nouveaux développements du projet pilote de Lausanne, un autre partenaire semble jouer un rôle de plus en plus important, ce sont les services en charge de la promotion économique. En effet, connaître les ressources consommées, mettre en évidence les ressources disponibles et démontrer leur bon usage par la communication de bonnes pratiques entre acteurs du secteur privé augmentent l'attractivité du territoire et la promotion économique peut alors s'appuyer sur ces éléments pour motiver de nouvelles entités économiques à s'implanter. Pour aller encore plus loin, les services en charge de l'environnement peuvent également utiliser ces connaissances pour favoriser l'installation des nouvelles entités respectueuses de l'environnement et organiser le territoire de manière plus efficace en termes de gestion des ressources. Cette stratégie devrait donc permettre d'influencer la planification territoriale dans les domaines du développement économique et industriel.

L'émergence de projets d'écologie industrielle en Valais depuis 2008 souligne de manière encore plus marquée l'importance des acteurs du développement économique. L'initiative du projet revient au département de l'économie et en particulier au service de promotion économique. Ses représentants souhaitent utiliser les symbioses industrielles et la connaissance des flux de matière pour promouvoir un développement éco-industriel. Il s'agit donc à nouveau d'utiliser les concepts de l'écologie industrielle pour pérenniser les activités économiques endogènes, mais également faire la promotion économique exogène. Ce cas de figure représente une nouvelle dimension de l'écologie industrielle. L'administration publique souhaite dans ce cas rendre son territoire plus attractif en mettant en évidence une bonne

gestion des ressources. Il s'agit dès lors d'un nouveau type de développement économique : le développement éco-industriel. S'il est censé optimiser l'usage des ressources, il ne remet cependant pas en cause le principe de leur consommation. Ces considérations sont reprises dans la discussion du Chapitre 5.

En conclusion, les pouvoirs publics en Suisse peuvent être qualifiés de proactifs car ils incitent les entités économiques à modifier leurs habitudes, en leur apportant un soutien en matière d'apprentissage organisationnel, en utilisant les outils législatifs à disposition, et en mettant en place des politiques publiques. Ces interventions se font dans un esprit de concertation et d'ouverture qui facilite l'échange d'informations et la création de liens de confiance. En résumé, il s'agit essentiellement pour l'Etat de créer des lois environnementales limitant les émissions de certaines substances et interdisant l'utilisation de nombreuses autres, mais également de créer un dialogue avec les acteurs du secteur privé pour les accompagner vers une meilleure intégration dans leur environnement géographique. Dans certains cas, elle force ce dialogue par l'intermédiaire de procédures d'autorisation et de suivi.

Le Tableau 9 résume la perception des symbioses industrielles par les pouvoirs publics en rapport avec leurs objectifs économiques, environnementaux et administratifs.

Tableau 9 : Critères de perception positifs et négatifs des symbioses industrielles par les pouvoirs publics.

Source : auteur.

	Perception positive	Perception négative
Economique	<p>Elles accroissent la compétitivité des entités économiques et pérennisent leur présence.</p> <p>Elles accroissent l'attractivité d'un territoire et favorisent l'implantation de nouvelles activités.</p>	<p>La participation et le soutien des pouvoirs publics à ce type de projet est parfois perçu comme une forme de consulting gratuit et public et est alors en concurrence avec le secteur privé.</p>
Environnemental	<p>Elles mettent en lumière de nouvelles opportunités d'économie de ressources.</p> <p>Elles participent à la réduction des impacts sur l'environnement.</p> <p>Elles amènent de nouvelles solutions permettant aux pouvoirs publics de confirmer ou le cas échéant de modifier certaines politiques publiques.</p> <p>Elles offrent de nouveaux critères pour organiser le territoire de manière plus efficace.</p>	<p>Elles peuvent exacerber la compétition entre les intermédiaires (collecteurs et recycleurs de déchets) et perturber le marché libre. Cela peut avoir un impact sur la tradition de dialogue entre acteurs privés et publics dans le domaine de gestion des déchets. Les intermédiaires agréés devraient être consultés en tant qu'experts en collecte, traitement et recyclage des co-produits et considérés comme des tiers opérateurs potentiels pour les symbioses réalisables.</p>
Administratif	<p>Elles représentent une nouvelle solution à apporter aux entreprises et permettent de mettre en lumière de nouvelles opportunités, renforçant le rôle de l'Etat dans la thématique de l'environnement.</p>	<p>L'historique culturel et politique du territoire. Lorsque plusieurs tentatives de développer des projets destinés à favoriser l'apprentissage organisationnel et l'échange d'informations entre entreprises ont été réalisés, avec un succès mitigé, l'administration cantonale peut se monter dubitative face aux symbioses industrielles.</p> <p>Lorsque les symbioses industrielles sont perçues de manière positive, les attentes peuvent être importantes et parfois exagérées, ce qui peut à terme, entraîner de la déception.</p>

2.6.4 Perception des entités économiques

Van Berkel, Willems et al. (1997) expliquent que les facteurs externes qui incitent une entreprise à réduire ses impacts sur l'environnement sont la législation, la pression du marché, la pression du public et la responsabilité liée à l'impact d'un produit. Aujourd'hui, nous pourrions ajouter les valeurs, l'éthique, l'image et la responsabilité sociétale. La perception de ces éléments diffère néanmoins selon la taille et la complexité d'une entreprise car plus elle est complexe et multidimensionnelle (nombre élevé d'unités locales et diversité de la production), plus elle est animée de courants et de contradictions dans son fonctionnement interne et dans ses processus de décision. De plus, il existe parfois une distance morale et sociale importante entre différents services de l'administration et de la production, dont les objectifs divergent.

En Suisse, les préoccupations environnementales sont essentiellement du ressort des responsables qualité, sécurité, environnement (QSE) en charge du management environnemental et indirectement des services de communication et de marketing des questions de durabilité. A contrario, le ou les organes de direction, comme le conseil d'administration, sont en charge des aspects stratégiques et du développement des activités. Leurs préoccupations consistent le plus souvent à accroître la productivité et la marge bénéficiaire de l'entreprise. La problématique environnementale, dont les règles sont en majorité dictées par des éléments extérieurs à l'entité économique, est donc particulièrement exposée à ces contradictions. Les rencontres et les audits réalisés au cours des projets pilotes confirment que bien que l'environnement soit de plus en plus souvent pris en compte dans les processus décisionnels des entreprises, la demande des marchés tient toujours lieu de modèle économique principal dans la tête des managers.

Les réglementations environnementales deviennent de plus en plus contraignantes et obligent les entreprises à modifier certaines de leurs habitudes. En particulier, l'instauration du principe du pollueur-payeur pour la gestion des déchets générés par les activités économiques (Section 2.4.2) les a obligés à assumer leurs responsabilités. Elles sont donc financièrement responsables de la gestion de leurs déchets, ce qui les incite souvent à chercher les filières de valorisation les moins coûteuses mais pas forcément les plus efficaces.

Les entreprises du territoire suisse respectent de manière générale la législation environnementale en vigueur mais leurs actions restent néanmoins en majorité réactives et ponctuelles. Les professionnels de l'environnement, les consultants et les représentants des pouvoirs publics doivent déployer une énergie considérable pour motiver des actions proactives de plus grande ampleur et étendre les connaissances environnementales des entités économiques. Dans le passé, il s'agissait essentiellement de modifier certaines habitudes inutiles ou auxquelles l'entreprise n'avait pas prêté attention. Depuis l'essor du « end-of-pipe » dans les années 70, les efforts se sont généralement concentrés sur des substances problématiques, des points d'émission ou des sites particuliers. Cette stratégie a par ailleurs fait

augmenter de manière importante les dépenses des entreprises liées à l'environnement en Suisse, entre autre par l'introduction du principe du pollueur-payeur (Roudit 2006). Le concept d'écologie industrielle, impliquant la reconnaissance d'un lien fondamental entre l'entreprise et son environnement géographique et politique direct ou plus lointain, avait alors un degré de pénétration faible dans les organes de management. Depuis quelques années, la plupart des entreprises ayant pris part aux études de cas de Genève et de Lausanne appliquent néanmoins les solutions d'optimisation permettant un retour sur investissement rapide, de l'ordre de 1 à 3 ans.

Pour que la notion de durabilité ait un sens, il faut que l'entreprise prenne conscience de l'avantage de son intégration dans un système complexe impliquant l'environnement, la technologie et l'économie. Le but d'un coordinateur de projet de symbioses industrielles est de proposer une nouvelle approche proactive de la gestion des ressources et d'inciter les entreprises à étudier de nouvelles options qui doivent permettre la remise en cause du modèle traditionnel d'activité économique basé uniquement sur la production et le savoir-faire et d'entrer ainsi dans une nouvelle phase d'apprentissage organisationnel.

La conjoncture économique et cognitive est aujourd'hui favorable aux stratégies comme l'écologie industrielle. Nos interlocuteurs l'ont d'ailleurs bien compris puisqu'entre 2005 et 2008 presque 50% des entreprises contactées ont accepté de nous transmettre des informations détaillées sur leur flux de matière et d'énergie sans craintes liées à la confidentialité. Les incertitudes économiques et celles liées à l'approvisionnement à long terme de certaines ressources incitent les entreprises à réfléchir à la pérennisation de leur activité. Parallèlement, l'apparition d'une nouvelle génération de consommateurs qui exigent des biens aux impacts environnementaux réduits les oblige à améliorer leur image et leurs pratiques. Les concepts comme l'éco-design et l'analyse de cycle de vie sont de mieux en mieux connus des entités économiques et de plus en plus intégrés dans les processus de décision mais l'impact sur l'ensemble du système de production reste néanmoins marginal à l'heure actuelle. L'intégration de ces concepts au cœur de la stratégie d'entreprise revient à créer un nouveau modèle économique et industriel intégrant le design, la planification des activités, la logistique, le marketing, l'innovation technologique et les symbioses industrielles. Ce nouveau modèle n'est pas encore bien compris par certains cadres et dirigeants d'entreprise qui ne perçoivent pas les opportunités que cela représente à moyen et à long terme. Premièrement, leur préoccupation semble rester la maximisation de la marge bénéficiaire à court terme, sans réellement se préoccuper de l'évolution des connaissances sur la disponibilité des ressources et des risques que cela représente pour leurs activités. Deuxièmement, de plus en plus d'entreprises publient des rapports extrafinanciers qui traitent de la responsabilité sociétale de l'entreprise, donc des questions environnementales. Le risque de voir les symbioses industrielles utilisées comme outil de communication, sans que l'entreprise ait réellement amélioré sa consommation de ressources est important.

Il est donc nécessaire de motiver l'entreprise à agir. Introduire de nouveaux concepts au sein d'un groupe d'entreprises nécessite un accès privilégié et une bonne compréhension de leur fonctionnement. La Figure 39 décrit les interactions entre le coordinateur d'un projet de symbioses industrielles et les services

administratifs d'une entité économique. Les nombreux contacts que j'ai eus avec des entreprises entre 2005 et 2009 ont démontré que le réel travail de persuasion et d'accompagnement dans le changement commence lorsqu'un responsable qualité-sécurité-environnement (QSE) décide de soumettre une symbiose industrielle potentielle à sa hiérarchie. Pour mieux comprendre cette affirmation, il est nécessaire de rappeler que les synergies touchent essentiellement l'approvisionnement en matières premières et la gestion des co-produits, activités qui ne sont que partiellement à la charge du QSE, lorsqu'un tel poste existe. La tâche d'un QSE n'implique pas non plus les activités de design de produit, la logistique et rarement les choix technologiques.

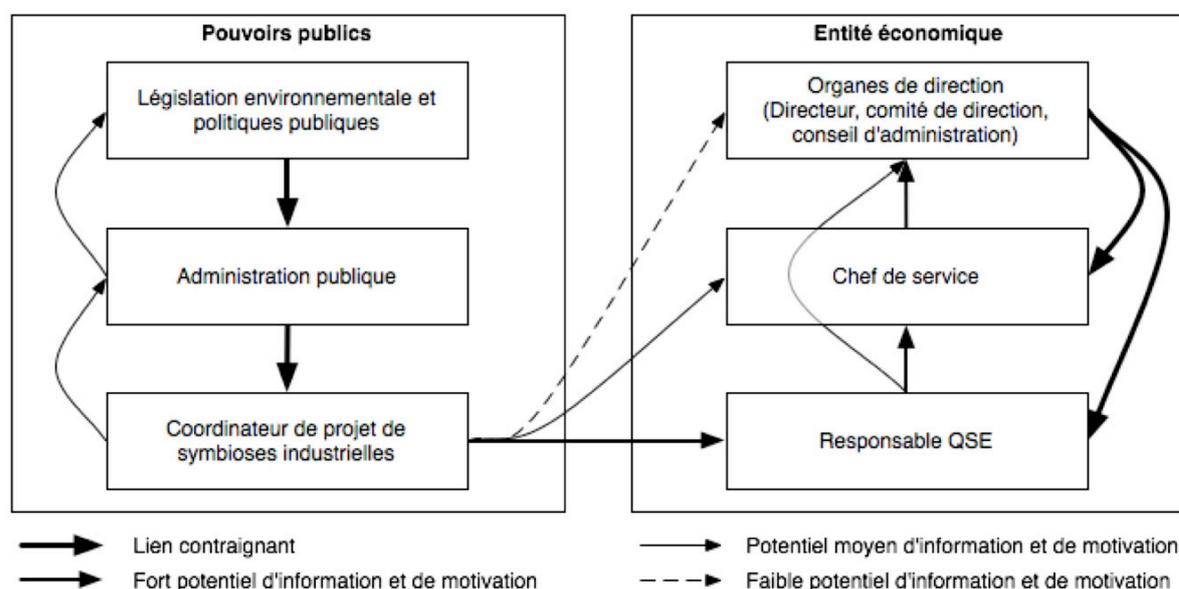


Figure 39 : Schéma des interactions entre un coordinateur de projet et une entité économique et en fonction du pouvoir d'influence dans les processus de décision. Source : auteur.

En conclusion, le pouvoir décisionnel limité des QSE, un poste apparu au sein de l'organigramme de l'entreprise il y a une quinzaine d'années, peut, conséquemment, dans certains cas, représenter un handicap dans le processus de mise en place des projets de symbioses. Leur position à la frontière entre les problématiques de qualité et de sécurité de la production et la nouvelle problématique environnementale, fait qu'ils doivent fréquemment justifier leurs actions. Pour cela, ils montrent parfois une grande motivation à développer de nouveaux projets. Cependant, ils n'ont que rarement réellement voix au chapitre dans la prise de décisions stratégiques et financières de l'entreprise. Un projet d'écologie industrielle peut donc rencontrer un bon écho dans les premières phases de discussion et d'analyse, puis être qualifié de non recevable par la direction pour cause de vision divergente en particulier en ce qui concerne les investissements et les temps de retour sur investissements attendus. Les entreprises suisses sont nombreuses à disposer d'un service qualité-sécurité-environnement ou au moins d'un

responsable QSE. Si cette personne s'impose de par ses responsabilités comme un partenaire privilégié, il peut s'avérer nécessaire de lui adjoindre une personne issue du comité de direction. Celle-ci sera en effet plus à même de manifester l'intérêt de l'entreprise pour l'une ou l'autre des solutions proposées.

Par exemple, les principes consistant à favoriser l'approvisionnement en ressources endogènes pour minimiser les impacts sur l'environnement, par exemple, sont ainsi encore peu intégrés dans les choix stratégiques. Un changement a néanmoins été remarqué depuis deux ans, particulièrement à Genève. Une politique publique proactive et novatrice dans le domaine de l'approvisionnement énergétique incite les entreprises au changement. Si nombre d'entre-elles se déclarent prêtes à changer certaines de leurs habitudes, elles ne sont cependant pas disposées à prendre tous les risques.

Il s'agit en dernier lieu de mentionner ici les entités économiques appartenant à l'Etat. En Suisse, de nombreux services sont assurés par des entités économiques publiques, appelées souvent entités du service public qui se doivent aujourd'hui d'être exemplaires en termes de gestion environnementale. Elles fonctionnent également avec moins de contraintes économiques et sur un modèle différent. Ces entités peuvent représenter un levier important pour la création de symbioses industrielles en servant d'exemples.

Pour résumer les considérations précédentes, les entités économiques perçoivent les symbioses industrielles comme un mélange de contraintes et d'opportunités que nous résumons dans le Tableau 10. Les deux principales barrières identifiées sont d'ordre économique et organisationnel. Cette perception est fonction du secteur d'activité considéré, de la taille de l'entité économique et de sa position sur le marché, mais l'ensemble des entreprises contactées insiste sur le besoin de retour sur investissement rapide et sur le risque de dépendance à l'égard d'autres entreprises qui pourraient disparaître ou se déplacer. Nous reviendrons sur la composante économique dans l'analyse des synergies potentielles par famille de ressource, proposée au Chapitre 4, et sur la notion de dépendance entre les entreprises impliquées dans une symbiose dans la discussion du Chapitre 5 (Section 5.4).

Tableau 10 : Critères de perception positifs et négatifs des symbioses industrielles identifiés par le coordinateur de projets. Source : auteur.

	Perception positive	Perception négative
Economique	<p>Possibilité d'accroître la marge bénéficiaire d'un produit (économies sur les coûts d'approvisionnement et / ou sur les coûts de traitement).</p> <p>Le lien créé avec d'autre entreprise lui permet de s'ancrer dans le territoire et donc de pérenniser sa présence.</p>	<p>Importance des investissements demandés par certaines solutions et du temps de retour sur investissement.</p> <p>Nécessité d'élaborer un modèle financier pour la collaboration entre les différents partenaires.</p> <p>Problématique de la responsabilité juridique en cas de problème impliquant un flux échangé.</p>
Environnemental	<p>Le premier élément concerne le respect de la législation environnementale.</p> <p>Prendre part à un tel projet permet ensuite à l'entreprise de communiquer sur ses bonnes pratiques en termes de développement durable et d'éco-efficacité. Elle en retire donc un gain d'image qui relie les problématiques environnementales et économiques.</p>	<p>Dans certains cas, les responsables ne perçoivent pas l'intérêt d'une approche proactive de la question environnementale (mécanisme cognitif). Les mécanismes structurels et politiques du territoire jouent également un rôle dans ce cas.</p>
Gestion & administration	<p>La collaboration et les liens créés par le coordinateur permettent à l'entité d'accéder plus facilement à de nouvelles informations sur les bonnes pratiques et les meilleures technologies disponibles.</p>	<p>La collaboration avec d'autres entreprises oblige l'entreprise à communiquer sur ses techniques et ses procédés de production, ce qui peut l'exposer à ces concurrents ou à des contrôles des pouvoirs publics</p> <p>La collaboration avec d'autres entreprises, si un lien contractuel existe, rend l'entreprise dépendante d'autres acteurs économiques sur lesquels elle n'a pas de prise directe comme dans le cas d'une relation acheteur/fournisseur classique. Elle voit donc son indépendance diminuée, ce qui est perçu comme un risque.</p>

2.7 DISCUSSION

Les procédures 1 et 2 développées dans ce chapitre sont destinées à la concrétisation d'un type d'apprentissage organisationnel inter-entreprise appliqué à la gestion des ressources sur un territoire. Leur application sur deux territoires distincts permet de mettre en évidence leurs forces et leurs faiblesses. Les étapes de mise en œuvre présentées dans les Sections 2.5.1 et 2.5.2 représentent les versions les plus récentes et les plus abouties issues de expériences de terrain. En particulier, la méthodologie d'audit des entreprises a été largement modifiée entre 2005 et 2009 pour permettre d'affiner l'analyse des symbioses potentielles et d'élargir le champ d'investigation.

Présentés comme les premiers éléments à étudier, les critères de choix des activités économiques (activité, nombre d'employés, type de production), ont été modifiés tout au long des projets de terrain. Ceux qui ont été présentés dans la Section 2.5.1 s'étaient avérés pertinents dans les premières phases du projet. L'analyse de faisabilité technique des pistes a néanmoins mis en lumière un critère qui avait été sous-estimé : l'adéquation géographique a ainsi souvent handicapé la faisabilité des symbioses industrielles potentielles, car les activités économiques choisies étaient trop dispersées sur le territoire considéré. Les symbioses concernant l'eau et l'énergie s'en sont trouvées fortement handicapées. En effet, des puits et sources intéressants ont été identifiés pour ces deux familles de flux. Mais, comme les voisins directs des entreprises concernées n'ont pas été audités, il n'a pas été possible rapidement de dire si un échange était possible. De la même manière, les possibilités de mutualisation sont plus fortes dans des zones à forte densité d'activité. Les études de cas réalisées n'ont pas non plus considéré les ressources endogènes et renouvelables permettant la substitution de certaines ressources importées. Les données disponibles dans ce domaine sont en pleine expansion, en particulier à Genève. La dispersion géographique des activités économiques contactées dans la première phase du projet constitue le principal point faible du projet pilote de Genève. La procédure d'audit proposée dans la Section 2.3 permet de mieux prendre en compte le voisinage direct d'une activité économique auditée et le potentiel des ressources renouvelables disponibles à proximité. Il apparaît dans certains cas plus intéressant de substituer un combustible fossile et un vecteur renouvelable et parallèlement d'optimiser les procédés concernés afin d'éviter les rejets de chaleur que de créer un réseau de réutilisation de cette chaleur résiduelle. Ces aspects devront être mieux pris en compte dès le début lors des prochains projets et une pesée des intérêts devra être réalisée par le coordinateur afin de s'assurer que la solution proposée est réellement la plus efficace et celle qui minimise les impacts sur l'environnement. Ainsi, la sélection des entités économiques devra s'appuyer sur une meilleure connaissance du territoire et se centrer sur des concentrations d'activités comme les zones industrielles. C'est d'ailleurs la solution proposée pour la phase d'analyse du territoire proposée pour la deuxième procédure.

En plus des critères techniques, il est également intéressant de remarquer que la distance mentale entre les acteurs économiques est plus faible au sein d'une forte concentration d'activités, comme c'est le cas dans les zones industrielles (voir la description du mécanisme cognitif, Section 2.2.1). Les liens sociaux entre acteurs sont plus intenses et les mécanismes cognitifs sont plus faciles à appréhender. L'existence d'associations d'industriels et l'historique des collaborations autour de la gestion de la zone fait qu'un lien de confiance existe la plupart du temps déjà et peut servir de déclencheur important dans toutes les phases d'un projet.

Les considérations précédentes questionnent la pertinence de la procédure 1 et de la méthodologie d'audit. La collecte exhaustive de données par l'intermédiaire d'un audit des chaînes de production et la réalisation de visites individuelles se sont avérées être des démarches appréciées des entreprises. Dans de nombreux cas, elles leur ont permis de mieux connaître leurs flux de matière et d'énergie. Par contre, la réalisation d'un bilan de flux exhaustif leur demande du temps et de la disponibilité. De plus, la méthodologie d'audit utilisée pour les études de cas de Genève et de Lausanne était uniquement centrée sur les symbioses industrielles et la recherche d'opportunité, sans prendre en compte l'environnement direct de l'entreprise, ni les possibilités d'optimisation et d'intégration des procédés à l'intérieur des limites de l'entreprise. Dans certains cas, ces facteurs ont été limitants pour obtenir des données complètes et détaillées.

Les données récoltées sont néanmoins importantes pour détecter des potentiels de symbioses industrielles, mais également des possibilités d'optimisation à d'autres niveaux. Des bilans peu précis ou incomplets handicapent la détection de potentiels et diminuent la pertinence des solutions proposées par le coordinateur. La recherche de symbioses industrielles potentielles par le coordinateur de projet grâce à l'outil Presteo a révélé certaines faiblesses. En particulier, le nombre important de résultats se révélant être des faux-positifs au regard des critères de faisabilité énoncés dans la Section 2.4, rend le travail du coordinateur complexe et lui demande des connaissances approfondies dans tous les domaines de l'industrie. 95 % des correspondances détectées par Presteo, comme par SymbioGIS, doivent être éliminées en procédant à une analyse de faisabilité préliminaire. De plus, la nomenclature utilisée ne garantit pas une détection de tous les potentiels existants. Les considérations sur les systèmes d'information et la nomenclature des flux font l'objet d'une analyse détaillée dans le Chapitre 3, Section 3.3.2. Néanmoins, la collecte de données exhaustives permet la réalisation d'analyse de flux de matière des activités économiques pouvant servir de base à plusieurs types de travaux, comme des analyses de cycle de vie. En ce qui concerne les actions de l'entreprise elle-même, la connaissance et la modélisation des flux entrants et sortants permettent d'inclure ses préoccupations dans le management et les processus de décision internes. A l'échelle du territoire, il est possible de s'appuyer sur les audits pour réaliser des analyses de flux de matière ciblées, par exemple pour une zone industrielle. Ceux-ci peuvent ensuite être utilisés comme base décisionnelle pour l'aménagement et l'organisation du territoire, ainsi que pour la mise en œuvre de stratégies environnementales.

Pour que les éléments précédents aient un impact significatif, les phases de retour aux entreprises sont également délicates. Dans certains cas, l'audit effectué et la détection de synergies potentielles n'ont pas abouti à des propositions pertinentes. Il est délicat pour le coordinateur de retourner vers une entreprise qui a dépensé du temps pour réaliser un audit en lui apprenant qu'aucune piste intéressante n'a été identifiée. Cette situation, qui s'est produite à plusieurs reprises, handicape la dynamique du réseau et diminue la motivation de ses partenaires. Une solution dans ce cas consiste à proposer à l'entreprise d'analyser les données récoltées sous un autre angle, comme l'efficacité des filières de valorisation des déchets existantes ou les possibilités d'optimisation à l'interne de ses procédés, ce que permet partiellement la méthodologie d'audit proposée. Un effet positif collatéral est néanmoins que l'entreprise acquiert des connaissances sur la gestion des ressources, leur disponibilité en général, et en particulier sur ses propres flux et la manière dont elle les utilise.

En conclusion, il serait pertinent à l'avenir d'inclure les procédures de terrain et la méthodologie d'audit dans des approches plus larges comme l'éco-efficacité ou la performance environnementale. Les symbioses industrielles deviendraient alors un élément d'une démarche intégrée d'optimisation du système industriel regroupant les opportunités internes à l'entreprise et les collaborations inter-entreprises.

D'ailleurs, la procédure 1, si elle est complète et robuste, demeure lourde à mettre en œuvre et reste trop centrée sur les échanges de co-produits. Les deux éléments à retenir sont que, premièrement, le temps demandé aux entités économiques s'est révélé être important sans qu'en retour la détection d'opportunité soit assurée. Deuxièmement, la quantité de données collectées implique le recours à un outil de gestion de base de données performant pour le stockage et l'analyse des bilans de flux des entreprises. Ces éléments sont à mettre en lien avec les conclusions du Chapitre 3.

La procédure 2 a été développée en partie pour répondre à ces préoccupations. Elle permet de réduire l'investissement en temps et en ressources humaines des entreprises dans les premières phases du projet et de susciter leur intérêt par l'intermédiaire des ateliers thématiques. Néanmoins, l'audit des activités intéressantes et les étapes de mise en œuvre se rapprochent de la procédure 1. En détaillant les différences et similitudes entre les deux procédures proposées, il apparaît comme évident qu'elles sont complémentaires. La procédure 2 peut servir de déclencheur lorsque la mise en place d'une collecte systématique effraie les pouvoirs publics et les entités économiques. Ces considérations m'ont amené à réfléchir à une troisième procédure moins gourmande en temps et qui permettrait d'assurer un taux de retour positif plus élevé aux entreprises dès les premières phases du projet. Elle est développée dans la Section 2.7.1.

Aux considérations précédentes doivent être ajoutées les contraintes liées au morcellement institutionnel et politique du territoire Suisse. Les études de cas réalisées traitent de territoires de petite taille, à l'échelle institutionnelle du canton ou du groupement de communes. Or les activités économiques en Suisse sont de taille modeste, en majorité des PME, et de nombreux liens existent entre des entreprises de différents cantons, par l'intermédiaire d'associations de branches ou de consultants spécialisés dans un domaine

précis. Ainsi, s'il est important de travailler sur des fortes concentrations d'activité pour certains flux (eau, énergie), soit à l'échelle de la zone industrielle, il serait également pertinent de travailler à une échelle plus étendue, par exemple intercantonale. Techniquement, les symbioses industrielles existantes détectées dans le cadre des études de cas impliquent parfois des acteurs économiques situés dans d'autres cantons suisses (Chapitre 4). En Suisse romande, l'approche intercantonale semble la plus prometteuse pour deux raisons. Premièrement, comme nous venons de le mentionner, pour la diversité des activités économiques très dispersées sur l'ensemble du territoire. Deuxièmement, l'écologie industrielle amène une nouvelle manière de penser le développement et l'organisation d'un territoire. Or, celui-ci interagit fortement, politiquement et en ce qui concerne les flux de matière et d'énergie, avec les territoires voisins. Une approche commune de cette question permettrait d'approcher les symbioses industrielles à toutes les échelles géographiques et de favoriser les échanges d'informations et la reproduction des exemples réussis sur un territoire plus large.

De plus, les deux projets pilotes utilisés comme études de cas ont bénéficié d'un effet de nouveauté. Dans les deux cas, les symbioses industrielles étaient perçues comme une nouvelle option pour réduire les impacts environnementaux des activités économiques. Cet effet tend à s'estomper dans la durée, surtout si le temps nécessaire à la réalisation de nouvelles collaborations est long, parfois plusieurs années, comme c'est le cas pour les symbioses. Il est donc nécessaire d'intégrer la recherche de nouvelles opportunités et la communication qui l'accompagne dans une démarche plus large et plus pérenne.

En lien direct avec les deux projets pilotes utilisés comme études de cas, la création d'une plateforme romande dédiée à la diffusion des expériences réussies et à l'échange d'informations entre acteurs publics et privés dans le domaine des symbioses industrielles permettrait de pérenniser leurs efforts et de faciliter le rôle des coordinateurs. Une telle structure constituerait une forme d'organisation du type *facilitateur de réseau*, impliquant un nombre plus élevé de coordinateurs. Les tâches et les attributions possibles d'une plateforme romande sont détaillées dans la Section 2.7.2.

2.7.1 Propositions pour le développement d'une troisième procédure basée sur la reproduction de bonnes pratiques

Les principaux objectifs de cette troisième procédure par rapport aux expériences précédentes sont au nombre de trois. Le premier consiste en l'amélioration de l'analyse préalable du territoire pour détecter les zones à fort potentiel et les ressources endogènes de manière approfondie, en recherchant les expériences réussies et en identifiant les acteurs importants. Le deuxième objectif propose de réduire l'investissement des entreprises dans les premières phases d'un projet en modifiant le déroulement de l'audit et des ateliers thématiques afin de se concentrer sur la reproduction de bonnes pratiques existantes et sur les possibilités d'optimisation interne. Par bonnes pratiques, nous entendons ici les symbioses industrielles existant déjà sur un autre territoire ou sur celui considéré. Une première liste peut être élaborée grâce à la littérature spécialisée. Elle peut être enrichie des connaissances personnelles du

coordinateur et de sa connaissance du terrain. Finalement, le dernier objectif consiste à transformer le rôle du coordinateur dans le but de mettre en œuvre rapidement quelques bonnes pratiques pour motiver les entreprises, faciliter la communication et inciter les acteurs économiques à effectuer des audits de leurs chaînes de production. La concrétisation de symbioses aisément réalisables techniquement apporte une reconnaissance au coordinateur qui peut les utiliser dans sa communication et ainsi motiver des acteurs économiques de prime abord sceptiques. La collecte systématique d'informations détaillées sur les flux entrants-sortants sera également facilitée.

Dans le contexte Suisse, cette solution a néanmoins un impact limité. Le degré d'optimisation du système industriel est déjà élevé et les solutions pertinentes pouvant être adaptées depuis d'autres pays sont rares. Comme nous le verrons dans les Chapitres 4 et 5, la situation inverse recèle un potentiel bien plus intéressant. La Suisse a mis en œuvre un nombre important de législations, de politiques publiques et de filières de recyclage et de symbioses industrielles qui pourraient être reproduites sur d'autres territoires.

La troisième procédure peut être décrite comme déductive. Elle demande au coordinateur des connaissances approfondies de l'industrie, du territoire, des symbioses existantes dans le monde et des dernières innovations technologiques. Il s'agit d'une méthodologie rapide destinée à mettre en œuvre par un coordinateur expert.

La première phase d'un projet reprend les objectifs de la procédure 2 mais en les élargissant afin de disposer d'une connaissance approfondie du territoire. L'objectif est de détecter les zones et entreprises présentant un fort potentiel en matière de gestion des ressources. Les potentiels entre industrie, habitat et agriculture et la disponibilité des ressources endogènes sont également étudiés. Cette phase est réalisée avec l'aide d'un système d'information géographique et implique que des personnes travaillant depuis longtemps sur le territoire concerné ou certains services de l'Etat soient impliqués dans le projet. Une analyse des jeux d'acteurs est effectuée afin d'ancrer cette procédure dans son contexte institutionnel et politique. Un inventaire des lois, des ordonnances d'application, des programmes issus de politiques publiques et actions existantes (déchets, énergie, aménagement du territoire, développement durable et développement économique) doit être réalisé au préalable afin que le projet d'écologie industrielle s'intègre pleinement dans les autres démarches en cours sur le territoire.

Cette analyse du contexte peut être complétée par une recherche sur les bonnes pratiques locales en matière de gestion des ressources et sur une compréhension des principaux jeux d'acteurs et du fonctionnement du tissu industriel existant. L'enjeu est de s'appuyer sur la connaissance des acteurs locaux et des données statistiques disponibles afin de recenser et analyser les filières de recyclage et de valorisation des déchets actuellement en place dans le canton. Cela permet de localiser géographiquement les principaux producteurs de déchets et de mesurer leur efficacité. Elle a pour objectif de fournir une série de recommandations pour une meilleure gestion des déchets en amont d'une détection de symbioses industrielles.

En se basant sur ces informations, le coordinateur expert va pouvoir mettre en lumière une première liste d'opportunités de symbioses industrielles pour certaines zones industrielles ou pour l'ensemble du

territoire. Les solutions sont alors présentées par secteur d'activité, et non pour une raison sociale précise. Sa connaissance du terrain va faciliter la communication et l'émergence de flux d'information entre les acteurs de ces secteurs préalablement à toute analyse technique poussée. Le contact et le lien de confiance sont créés grâce aux ateliers thématiques, comme proposé dans la procédure 2, et des entretiens orientés vers la reproduction de bonnes pratiques à fort potentiel de retour sur investissement et réalisables dans un délai court.

Les relations entre le coordinateur et les acteurs économiques diffèrent sensiblement des procédures précédentes. Si une entreprise contactée accepte de recevoir le coordinateur ou de se rendre à un atelier, cela signifie qu'elle est intéressée au moins à discuter des opportunités la concernant. Il ne s'agit donc plus d'obtenir son accord pour collecter des données de flux, mais directement de lui demander si elle est intéressée à se voir proposer des solutions concrètes adaptées à son activité. Dans ce cas, le coordinateur pose directement une série de questions relatives à l'activité de l'entité concernée dans le but de cerner les bonnes pratiques les plus adaptées et d'évaluer le degré de connaissance des interlocuteurs en terme de flux de matière et d'énergie transitant dans l'entreprise. Si le coordinateur repère une ou plusieurs opportunités dont la faisabilité lui paraît assurée, il cherche à collecter des informations permettant de caractériser le flux ou les flux concernés quantitativement et qualitativement selon les champs de l'audit proposée à la Section 2.3.2. Si ces informations ne sont pas directement disponibles, le coordinateur peut proposer à ces interlocuteurs la mise en place d'un support technique pour la recherche des informations et la réalisation d'un audit complet des activités des entreprises selon la méthodologie proposée à la Section 2.3.

Le coordinateur expert, une fois un certain nombre d'entretiens ciblés réalisés ou après la tenue d'un atelier, peut ainsi conclure à la faisabilité et à la pertinence d'une bonne pratique. En relation avec les entreprises concernées, il pourra communiquer sur la faisabilité technique, légale et économique, ainsi que sur la pertinence environnementale d'une opportunité en recourant à des exemples concrets. La procédure de mise en œuvre de cette nouvelle approche est détaillée à la Figure 40. La dynamique et les résultats reposent ainsi plus encore sur les compétences de l'expert. La mise en place de réseaux d'échange d'informations entre entreprises et la résolution des problèmes techniques liés aux échanges de flux de matière et d'énergie reposent alors complètement sur ses épaules.

Cette dernière remarque pose la question du rôle central, prépondérant, du coordinateur dans les trois procédures proposées. Les tâches à assumer sont importantes et le deviennent encore plus lorsque l'on cherche à minimiser le temps investi par les entreprises. Cette position implique une grande responsabilité et le risque de voir la dynamique ralentir ou disparaître si celui-ci quitte le territoire, ou si le financement est interrompu, est élevé. La réponse est en partie fournie par la procédure 3. Dans son cas, le rôle du coordinateur se rapproche de celui d'un consultant expérimenté, spécialiste de l'éco-efficacité, de la performance environnementale, de l'innovation technologique et de la gestion du changement.

Cette troisième procédure ici n'a pas encore été appliquée sur le terrain dans le cadre d'un projet pilote en Suisse romande. Elle doit donc encore être testée sur le terrain. Le canton de Vaud pourrait être le premier territoire en 2011 déjà.

Il est intéressant de mettre en évidence l'augmentation du nombre de liens entre les différentes étapes des procédures proposées. La procédure 3 discutée ici est la plus complexe. Elle est ainsi le reflet de la complexité des jeux d'acteurs d'un territoire et des stratégies d'apprentissage organisationnel. Le nombre de mécanismes auxquels le coordinateur doit être attentif est important (six) et à chaque étape, un acteur économique peut se désister, ce qui implique une recherche constante de nouveaux contacts et de nouvelles opportunités.

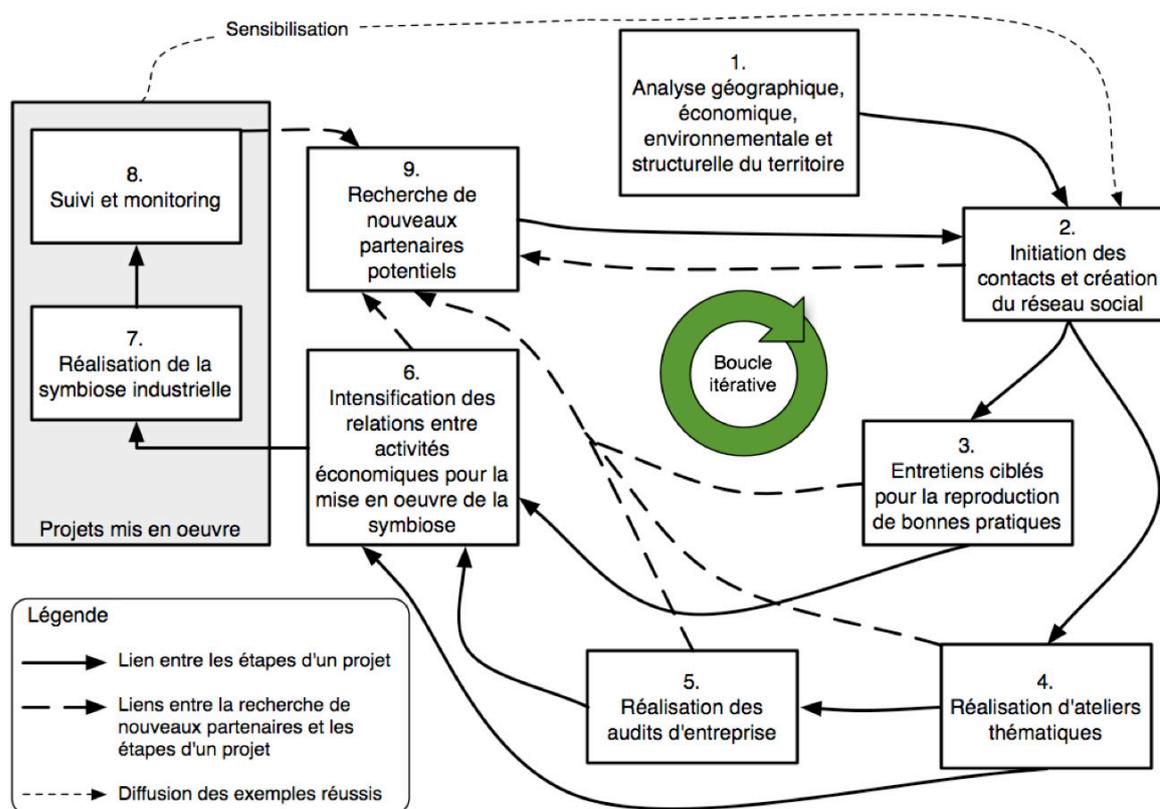


Figure 40 : Organigramme de projet de la procédure 3 pour la détection de symbioses industrielles. Le coordinateur joue ici un rôle central proche de celui d'un consultant. Source : auteur.

2.7.2 Création d'une plateforme romande sur les symbioses industrielles

Nous avons énoncé précédemment l'idée de travailler à une échelle géographique plus large, par exemple intercantonale, afin de faciliter la reproduction d'expériences réussies et de pérenniser les projets pilotes en les inscrivant dans une démarche plus large. Cette section traite de la création d'une plateforme

d'échange d'informations et de collaboration sous la forme d'une structure d'accompagnement pour accélérer l'émergence de symbioses industrielle en Suisse romande. En s'appuyant sur les méthodologies et les procédures détaillées précédemment, sa compétence peut se situer à cheval entre plusieurs domaines comme la centralisation et la mise à disposition d'informations sur les expériences de symbioses industrielles en Suisse et dans le monde, la détection de nouvelles opportunités, l'accompagnement technique des projets jusqu'à leur mise en place ainsi que la diffusion et la valorisation des expériences romandes en Suisse et à l'étranger. Ces tâches requièrent plusieurs types de compétences : recherche-développement, science de l'ingénieur, communication et négociation.

La Suisse romande est un bassin d'environ 2 millions de personnes, fractionné en 6 cantons et 889 communes. Si plusieurs communes et régions initient des démarches de détection et de mise en place de symbioses industrielles (c'est le cas actuellement à Genève, Vaud, Fribourg et dans le Valais), la réalisation de ponts permettant des collaborations entre ces projets est actuellement inexistante. Le contexte politique et culturel romand fait que la plateforme devra s'adresser en priorité aux acteurs économiques, mais sans oublier les interactions entre le secteur privé et les institutions publiques. Les tâches possibles de la plateforme sont détaillées dans le Tableau 11.

Dans la Section 2.6.4, nous mentionnons que de nombreux acteurs économiques sont prêts à changer leurs habitudes. Néanmoins, ils émettent majoritairement le besoin d'être accompagnés dans cette démarche. Ainsi, il est possible de proposer deux niveaux d'action. Chaque niveau implique un engagement différent de la part des acteurs économiques. Le premier concerne la mise à disposition, par l'intermédiaire d'internet, d'un espace permettant à l'entreprise de déposer des annonces concernant certains de ses flux entrants ou sortants ou présentant des expériences réussies. Cette opportunité, gratuite, permet à l'entreprise de chercher une solution de réutilisation pour un flux problématique. L'entreprise peut « poster » autant d'annonces qu'elle le souhaite. La réponse peut être de deux sortes : premièrement, une autre entreprise lit l'annonce et y répond ; deuxièmement, le et les coordinateurs sont à même de proposer une solution adaptée et d'entrer ainsi en contact avec l'entreprise. Le coordinateur peut alors transmettre la question à un organisme académique spécialisé, à même de répondre à la question posée. Le deuxième niveau d'engagement consiste à proposer aux entreprises rejoignant la plateforme ou à des entreprises désireuses de s'installer sur le territoire des solutions techniquement, économiquement et légalement réalisables pour certains de leurs flux. Pour les entreprises présentant un fort potentiel, il s'agira de réaliser un audit en vue de détecter de nouvelles symbioses potentiellement réalisables.

Ce chapitre a mis en évidence l'importance de l'origine du financement d'un tel projet. L'option la plus plausible aujourd'hui dans le contexte romand consiste en la mise en place d'un partenariat public-privé. Cette plateforme s'adresse en priorité aux acteurs économiques du territoire mais, la gestion de celui-ci dépendant des collectivités publiques, ces dernières devront également s'investir dans le projet. La participation des cantons pourrait se faire par l'intermédiaire d'une contribution financière, la mise à disposition de données sur le territoire et les activités économiques (données spatiales et non spatiales). Il

serait également pertinent de demander aux autorités cantonales concernées d'accompagner le processus de communication. La tradition de collaboration existante en Suisse est un atout pour motiver les acteurs économiques. Les institutions et services en charge du territoire les plus concernés par cette problématique sont les services de gestion et de protection de l'environnement cantonaux et communaux, les services de promotion économique régionaux et communaux, les organes de pilotage des Agenda 21 régionaux ou locaux et les associations professionnelles comme les chambres de commerce.

De leur côté, les acteurs économiques pourraient d'une part participer financièrement et d'autre part soutenir techniquement la plateforme en faisant part de leurs expériences. Leur participation pourrait être calculée en fonction de leur secteur d'activité, du type d'activité industrielle, de leur chiffre d'affaire et du nombre d'employés. La Suisse romande compte plusieurs dizaines de milliers de PME. Le potentiel est donc important. Une participation basée sur les mêmes critères sera demandée à toute nouvelle entreprise désireuse ou nouvellement implantée sur le territoire et souhaitant rejoindre le projet.

Nous l'avons dit à de nombreuses reprises, l'échange d'informations implique un lien de confiance. L'ensemble des acteurs doit percevoir la plateforme de manière positive pour accepter de communiquer sur ses habitudes et sa consommation de ressources. Comme indiqué dans les procédures de collecte des données et de mise en œuvre des symbioses, la confidentialité des données devra être garantie par les organes porteurs de la plateforme. Ceux-ci assureront leur confidentialité et leur utilisation uniquement dans le cadre de la détection de symbioses proposées par la plateforme.

Finalement se pose la question de l'intégration de cette plateforme dans les structures publiques et privées existantes en Suisse romande. Son intégration dans les activités d'un organisme déjà actif dans les domaines du développement économique et de la protection de l'environnement. En Suisse romande, les partenaires les plus intéressants seraient :

- La Conférence romande des responsables de la protection de l'environnement (CREPE). Elle regroupe les directeurs des services de l'administration publique en charge de l'environnement des cantons romands.
- L'agence de développement économique couvrant le territoire de Berne à Genève (Greater Geneva Berne Area ²⁶) présente l'énergie et l'environnement comme un des dix secteurs d'activité les plus dynamiques. Intégrer la dimension de l'éco-efficacité et de l'écologie industrielle à leurs services aux entreprises aurait un poids important.
- La plateforme CleantechAlps²⁷ lancée dans le cadre de la stratégie de promotion sectorielle des chefs des départements de l'économie publique de la Suisse occidentale (CDEP-SO). Sa mission est de promouvoir la Suisse occidentale en tant que pôle européen en matière de technologies propres afin de favoriser le développement de nos sociétés et instituts. Son rôle de moteur intercantonal pour le développement des cleantech en fait un interlocuteur privilégié.

²⁶ <http://www.dews.com>, site consulté le 13 février 2011.

²⁷ <http://www.cleantech-alps.com> site consulté le 13 février 2011.

La Confédération a également publié un masterplan pour soutenir les cleantech en Suisse (OFFT 2010). Il a pour but de renforcer durablement le soutien à l'innovation dans le domaine de l'environnement en Suisse. Le document définit les cleantech ainsi :

Les cleantech désignent un mode de production durable qui respecte les ressources et regroupent les technologies, les processus de fabrication et les services qui contribuent à protéger et à préserver les ressources et les systèmes naturels. Tous les maillons de la chaîne de création de valeur sont concernés, du domaine de recherche et développement aux exportations en passant par la production de biens d'investissement.

L'émergence d'une plateforme d'information sur les symbioses industrielles et les expériences réussies dans le domaine de la gestion des ressources s'inscrit parfaitement dans ce cadre et pourrait servir d'assise à un réseau d'organismes de recherche et de consultants spécialisés dans l'amélioration de la gestion des ressources. Cependant, le risque de récupération des symbioses industrielles comme stratégie de communication de la part des entreprises et des pouvoirs publics doit être souligné.

Tableau 11 : Enoncé des domaines de compétences possibles d'une plateforme romande sur les symbioses industrielles. Source : auteur.

Domaine d'action	Compétences	Détail de l'action
Veille technologique nationale et internationale	Suivi technique Recherche-développement	Réalisation d'une veille technologie et de l'innovation dans le domaines de la gestion des ressources au niveau international. Analyse et retour d'expériences sur le contexte local des projets et les mécanismes politiques, structurels, culturels et cognitifs en cours. Détails sur l'origine de l'initiative, son financement et la méthodologie de mise en œuvre. Les gains environnementaux, sociaux et économiques des symbioses.
Adaptation du concept au contexte local	Recherche-développement Communication	Diffuser et rendre compte des nouvelles tendances et des innovations technologiques en Suisse. Étudier l'applicabilité des symbioses existantes dans le contexte Suisse afin de proposer des solutions appropriées aux entreprises du territoire. Élaborer un système centralisé de suivi environnemental et économique des symbioses mises en place en se basant sur les systèmes d'indicateurs du territoire, l'analyse des impacts environnementaux et les indicateurs de la comptabilité physique.
Communication et diffusion de l'information auprès des collectivités publiques et des acteurs économiques	Communication	Valorisation et diffusion des informations recueillies dans les points 1 et 2 par l'intermédiaire d'une interface de mise à disposition du public cible (site internet et animation). En parallèle, la sensibilisation aux approches de symbioses industrielles sera complétée par l'organisation de rencontres (séances d'informations, séminaires, workshops) avec les acteurs locaux.
Coordination et suivi technique des projets de terrain	Suivi technique	La mise en place d'une structure réactive de communication permettra aux coordinateurs de projet, aux organismes académiques et aux consultants des différents territoires et aux acteurs publics et privés d'obtenir des informations adaptées et pertinentes. Ils pourront également échanger de l'information, mettre en lumière de nouvelles opportunités et bénéficier de conseils techniques.

2.8 CONCLUSION

Les procédures de terrain décrites dans ce chapitre sont destinées à mettre en place une dynamique de collaboration entre pouvoirs publics et acteurs économiques sur la question de la gestion des ressources. Elles s'appuient sur une approche de type inventaire de cycle de vie et sur une méthodologie d'audit des activités économiques. Leurs principaux objectifs sont la détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles. Cependant, elles peuvent être appliquées à d'autres enjeux de la gestion du territoire car elles se trouvent à l'interface entre les sciences de l'ingénieur, l'aménagement du territoire et son développement économique. Les trois procédures proposées mettent en avant le rôle central, même parfois trop important, d'un coordinateur en charge de créer et d'animer les échanges d'informations. Sa position au sein des institutions et organisation du territoire revêt une importance particulière. Le succès de ses actions dépend en effet du contexte structurel, politique et culturel dans lesquelles elles s'inscrivent.

La Suisse possède un contexte cognitif et culturel particulièrement favorable au dialogue. Les pouvoirs publics ont axé leurs actions depuis plusieurs décennies sur le dialogue et la création d'un climat de confiance qui incite les acteurs économiques à collaborer. Le degré de connaissance des problématiques de l'environnement au sein des entreprises est élevé. Celles-ci sont donc ouvertes à l'étude de solutions novatrices, même si elles impliquent le changement de certaines de leurs habitudes.

Les procédures proposées se basent fortement sur ce contexte. Elles se sont révélées adaptées à la Suisse pour créer le dialogue et permettre l'échange intense d'informations. Les acteurs économiques ont été fortement demandeurs des conseils du coordinateur pour accroître leur connaissances des politiques publiques et des innovations technologiques liées à l'approvisionnement en ressources et à la gestion des déchets. Nombre d'autres eux ont particulièrement apprécié le concept de matières premières secondaires.

Cependant, comme nous le verrons dans le Chapitre 4, la marge d'optimisation des flux de matière et d'énergie en Suisse est faible, en comparaison à d'autres pays. La législation et les politiques publiques menées depuis plusieurs décennies font que les impacts environnementaux des activités économiques sont déjà faibles par rapport à d'autres régions du monde. De plus, le secteur secondaire en Suisse est principalement constitué de PME à haute valeur ajoutée, fortement dispersées sur le territoire et dont la consommation en ressources est variée mais de faible intensité. Ce contexte industriel et économique rend le rôle du coordinateur plus complexe et diminue le nombre d'opportunités pouvant être détectées grâce aux procédures de terrain.

En particulier, la procédure 3 qui propose la reproduction des bonnes pratiques de symbioses industrielles référencées dans la littérature spécialisée sera plus adaptée à d'autres territoires dont les réglementations environnementales sont moins contraignantes. A celles-ci pourront d'ailleurs être adjointes de nombreux

projets intéressants réalisés en Suisse romande. Le savoir faire suisse pourrait aider d'autres territoires à optimiser leur flux de matière et d'énergie, participant ainsi au dynamisme des cleantech en Suisse. L'Asie, région du monde produisant une grande quantité de biens de consommation à l'heure actuelle s'intéresse de près au concept des symbioses industrielles. Un transfert accru d'informations et d'expériences de terrain permettrait, en se basant sur la procédure 3, de faciliter l'émergence de parcs éco-industriels dans cette région du monde en se basant sur le référentiel législatif de la Suisse. Nous reviendrons plus en détail sur ces considérations dans la discussion du Chapitre 5.

Pour faciliter les transferts d'information et permettre au plus grand nombre de personne en charge du territoire ou au sein des entreprises d'accéder à des connaissances sur les symbioses industrielles réalisables, il est important que les procédures et la méthodologie d'audit soient publiques. C'est le cas en ce qui concerne les éléments développés dans le cadre de cette recherche. En cas de création d'une plateforme intercantonale, les expériences réussies, ainsi les symbioses industrielles potentiellement intéressantes dans le contexte suisse romand, seront alors également exemptes de droits. L'accès facilité à l'information et à la technologie a en effet un moteur important de la diffusion de l'innovation et un facteur de changement important.

Chapitre 3.

CREATION D'UN OUTIL INTEGRANT LES SIG POUR LA DETECTION DE SYMBIOSES INDUSTRIELLES

3.1 INTRODUCTION ET REVUE DE LITTERATURE

3.1.1 Les systèmes d'information géographique et l'aménagement du territoire

Les symbioses industrielles développées à l'initiative d'entités économiques ou grâce à l'intervention d'une tierce personne impliquent une modification de l'utilisation d'une ressource ou d'un co-produit au sein du système industriel. Elles ont un impact sur l'organisation des activités économiques et potentiellement sur l'aménagement du territoire considéré (Andrews 2002; Desrochers 2002). De la même manière, la faisabilité d'une symbiose industrielle dépend de l'organisation préalable du territoire (Adoue 2007). La compréhension du cheminement d'une ressource sur un territoire, comme les filières d'approvisionnement et de valorisation des déchets est facilitée par l'utilisation de logiciels spécialisés permettant de faciliter l'organisation des données ou leur diffusion par l'intermédiaire de systèmes d'information (Özyurt et Realff 2002; Brunner et Rechberger 2004).

Depuis deux décennies, la planification territoriale s'appuie intensément sur les technologies de l'information et de la communication (TIC), et en particulier sur les systèmes d'information géographique (SIG), pour comprendre la dynamique d'un territoire et le développer de manière harmonieuse. Selon Huber (1990), les technologies de l'information sont une variable permettant d'augmenter la qualité et la pertinence de l'intelligence organisationnelle et de la prise de décision, augmentant ainsi la performance des organisations concernées. Les TIC sont souvent considérés comme une manière de renforcer et de soutenir une communauté de personnes physiques et morales en améliorant l'échange d'informations et la communication entre acteurs. Les systèmes d'information (SI) englobent les plateformes, les logiciels et bases de données destinées à gérer les fonctions d'une organisation (Dewett et Jones 2001). Les SIG, impliquant une dimension spatiale, peuvent jouer ce rôle dans de nombreux cas en regroupant des outils et des procédures permettant d'acquérir, de traiter et de partager de l'information à caractère spatial ou non spatial (Huxhold 1991).

L'essor des SIG a profondément modifié la manière de voir le territoire et son occupation (Prélaud-Droux 1995). En effet, depuis plusieurs décennies, de nombreuses législations et politiques publiques ont été

prises en place pour résoudre les multiples conflits liés à l'utilisation du sol et aux infrastructures. En Suisse, la principale législation dans ce domaine est la Loi fédérale sur l'aménagement du territoire (LAT 1979). Elle introduit l'obligation pour les communes de réaliser un zonage de leur territoire et donc de définir l'affectation de leur terrain. Depuis l'essor de l'urbanisation, de l'industrialisation et des transports, la densité entre infrastructures et la proximité entre habitat, activités industrielles et agriculture, principalement en milieu urbain et péri-urbain, crée de nombreuses contraintes liées à l'accès aux ressources et à la limitation des risques pour l'environnement et la santé humaine (Ruegg 2000). Afin d'intégrer toutes les dimensions de cette problématique complexe, les plans sectoriels nationaux, les plans directeurs et d'affectation cantonaux et les plans d'affectation communaux (qui définissent le zonage), sont aujourd'hui presque tous réalisés à l'aide de supports informatiques intégrant les SIG. La visualisation simultanée de différentes sources d'information à l'origine non liées modifie la perception du territoire et donc influence les processus de décision. En aménagement du territoire, les SIG sont devenus nécessaires pour comprendre la complexité et la dynamique de l'organisation d'un territoire en permettant la géolocalisation des différents éléments qui le constitue. En relation avec l'aménagement du territoire, ils augmentent la compréhension du territoire et ce à plusieurs échelles en superposant différentes informations thématiques.

Les SIG remplissent ainsi trois tâches simultanément. Premièrement, ils possèdent un rôle de centralisation et de mémoire des informations utiles à la gestion du territoire. Plus concrètement, les logiciels SIG ont la particularité d'associer les données graphiques qui représentent l'espace géographique (données spatiales) et les données thématiques, représentant les caractéristiques des objets (données non spatiales). L'information géographique permet de lier des éléments spatiaux, comme la localisation et la forme, avec des attributs non spatiaux comme la consommation d'électricité, le prix d'un terrain, l'affectation du sol ou la consommation de ressources. Ceux-ci sont stockés dans une base de données liée au SIG. Les SIG apportent ainsi des solutions concernant leur gestion, leur acquisition, leur mise à jour, leur sélection et leur présentation. En résumé, les SIG permettent la combinaison de bases de données et de systèmes de visualisation et d'analyse géographique (Huxhold 1991; Goodchild 1992).

Deuxièmement, les SIG permettent de résoudre des problèmes à composante spatiale comme le calcul de distance entre objets, la détection de passages préférentiels, l'identification de zones tampons et la détection de lieux répondant à certains critères. Les SIG deviennent alors des instruments d'aide à la décision qui permettent des opérations telles que la sélection, la transformation et l'agrégation des informations (Burrough et McDonnell 1998; Özyurt et Realff 2002).

Troisièmement, ils intègrent dans certains cas des fonctionnalités permettant le partage de l'information entre plusieurs utilisateurs éparpillés sur un territoire. Ils constituent alors une plateforme de communication entre les nombreux partenaires intervenant dans les problématiques de la gestion du territoire : services de l'aménagement du territoire, de la protection de l'environnement, de l'agriculture ou des constructions. Les informations regroupées dans la plateforme peuvent également être

communiquées au grand public ou mises en consultation. Les SIG ont ainsi un rôle fédératif dans la gestion de projet (Prélaz-Droux 1995).

Le logiciel SIG les plus communément utilisés par les organes en charge de la gestion du territoire est ArcGIS²⁸. Manifold²⁹, nouvellement arrivé sur le marché, est encore confidentiel. Leurs applications sont nombreuses et touchent en particulier les domaines de la surveillance et l'aide à la décision dans de nombreux secteurs d'activité comme l'aménagement du territoire, la gestion des ressources naturelles et des infrastructures ou l'agriculture.

Les SIG recèlent également des faiblesses. Leur mise en œuvre est souvent très coûteuse, alors qu'ils sont fréquemment dimensionnés pour un utilisateur ou un petit groupe d'utilisateurs. Ils sont également peu compatibles entre eux, en particulier à cause des différences de logiciel et de contraintes liées à l'architecture des bases de données auxquels ils sont rattachés. De plus, le développement et la gestion de bases de données complexes et regroupant un grand nombre de données non spatiales directement dans les logiciels mentionnés précédemment ne sont pas conviviales. Une réponse actuelle à ces deux problèmes provient partiellement de l'essor d'internet. L'intégration des SIG dans le contenu accessible en ligne permet de réduire les coûts de développement tout en augmentant l'accessibilité aux informations en maintenant un contrôle et une mise à jour centralisés (Dragicevic 2004; Ingensand, Golay et al. 2008).

Le Chapitre 2 a mis en évidence les grandes quantités de données nécessaires à la détection et à la mise en œuvre de symbioses industrielles. Seul un petit nombre de SIG utilisés par les administrations suisses intègrent des données concernant la gestion des flux de matière liés aux activités économiques. Les dernières données créées concernent principalement les ressources renouvelables disponibles. En Suisse, certains outils existent en particulier dans le domaine de l'énergie (Girardin, Marechal et al. 2010) ou des ressources du sous-sol (Blunier 2009), mais ils se focalisent sur une ressource ou un domaine en particulier. Une approche globale de la problématique de la consommation des ressources apparaît comme nécessaire pour mettre en œuvre une planification territoriale favorisant une utilisation optimale des ressources.

3.1.2 Historique des systèmes d'information pour la détection de symbioses industrielles

L'essor des TIC a également concerné les domaines des symbioses industrielles. Depuis le milieu des années nonante, le développement de plusieurs logiciels destinés à faciliter leur détection a mis en évidence leur potentiel et leur utilité. En 2009, 17 outils destinés à faciliter la détection ou l'émergence de symbioses industrielles ont été identifiés dans la littérature scientifique. Ces travaux constituent une source d'informations et un retour d'expérience considérable pour aiguiller les choix conceptuels et

²⁸ Développé par la société ESRI (<http://www.esri.com>), site consulté le 4 mai 2010

²⁹ <http://www.manifold.net>, site consulté le 4 mai 2010

techniques liés aux réflexions et au développement d'un nouvel outil. Ainsi, les sections suivantes détaillent un certain nombre d'expériences, sélectionnées pour leurs liens directs avec cette recherche.

Cette section ne constitue cependant pas une liste exhaustive des systèmes d'information et des logiciels dédiés entièrement ou partiellement à l'optimisation de l'usage des ressources et en particulier à la détection, à l'évaluation et la mise en œuvre des symbioses industrielles. Il est possible de trouver des informations supplémentaires dans la littérature scientifique spécialisée et au sein d'un grand nombre d'institutions académiques traitant de ces problématiques.

Pour de plus amples informations, il est recommandé de consulter les publications suivantes : (Reuter 1998; Chertow 2000; Kincaid et Overcash 2001; Clayton, Muirhead et al. 2003; Casavant et Côté 2004; Fujita 2006; van Beers 2008; Ruth et Davidsdottir 2009; Grant, Seager et al. 2010).

3.1.2.1 *Designing Industrial Ecosystems Toolkit (DIET)*

L'outil DIET a été développé par la société Industrial Economics Inc. en partenariat avec l'Université de Clark pour l'Agence de Protection de l'Environnement des Etats-Unis. Le projet s'est étalé sur quatre ans, entre 1996 et 1999. Il a été utilisé sur le terrain à Burlington, dans le Vermont (IE 1998).

DIET consistait en trois logiciels : Facility Synergy Tool (FaST), Designing Industrial Ecosystems Tool (DIET) et Regulatory, Economic, and Logistics Tool (REaLiTy). Le premier était destiné à aider les acteurs de la planification à modéliser des parcs éco-industriels en identifiant des symbioses industrielles entre activités économiques. DIET était ensuite utilisé pour optimiser économiquement, environnementalement et socialement les symbioses potentielles détectées par FaST. REaLiTy permettait d'en identifier les barrières légales, économiques et logistiques (IE 1998; Chertow 2000).

DIET et en particulier FaST avaient alors plusieurs faiblesses. Premièrement, les logiciels étaient mono-utilisateur, ce qui empêchait leur utilisation par un ensemble d'acteurs dispersés géographiquement. Deuxièmement, la détection de symbioses industrielles se basait sur la comparaison des chaînes de caractères des flux entrants et sortants, mais sans mettre à disposition une base de données regroupant les noms de flux (nomenclature). Troisièmement, l'interface n'intégrait pas les SIG pour évaluer la faisabilité des symbioses. En conclusion, la détection de symbioses était peu fiable et demandait à l'utilisateur des connaissances des flux de matière et du terrain importantes.

3.1.2.2 *Abfallmanager et Abfallanalyser*

Depuis 1996, des chercheurs de l'Institut für Umweltwirtschaftsanalysen Heidelberg e. V. (IUWA), en Allemagne, étudient comment identifier des potentiels de symbioses industrielles, en se basant sur le modèle de Kalundborg, afin de le reproduire. Deux instruments ont été développés et appliqués dans la zone industrielle de Heidelberg-Pfaffengrund. Premièrement, un réseau de management environnemental a été développé afin d'accroître la confiance entre acteurs et faciliter l'échange d'informations.

Deuxièmement, plusieurs logiciels ont été développés afin d'analyser la gestion des déchets des entreprises et de trouver des solutions inter-entreprises. Leur objectif est de modéliser les pratiques existantes puis d'introduire de nouvelles solutions de valorisation (Sterr et Ott 2004; Adamides et Mouzakitis 2009).

La nomenclature utilisée par le premier programme, appelé Abfallmanager, reprend les codes de déchets de l'Union européenne. Ce logiciel, mono-utilisateur, permet d'analyser la gestion des déchets d'une entreprise en créant un bilan des flux entrants et sortants. Les données peuvent ensuite être transférées dans un second logiciel, Abfallanalyser, qui identifie les symbioses industrielles potentielles en se basant sur une comparaison des bonnes pratiques et une évaluation économique. Finalement, les résultats générés par Abfallanalyser sont compatibles avec le logiciel Umberto³⁰, un logiciel de modélisation et d'optimisation des flux de matière, qui peut être combiné à une interface GIS afin d'optimiser les paramètres logistiques. Abfallmanager et Abfallanalyser sont téléchargeables gratuitement³¹.

L'application dans la zone de Heidelberg-Pfaffengrund concerne principalement l'échange d'informations sur les méthodes de gestion des déchets. Un petit nombre d'échanges de matières ont également été mis en place. Selon Sterr et Ott (2004), si les logiciels ont constitué une valeur ajoutée, cette expérience a confirmé l'importance d'un réseau d'experts actifs sur le terrain et au sein d'un groupe d'entreprises situées dans un espace géographique restreint.

3.1.2.3 *MatchMaker!*

MatchMaker! a été développé par un étudiant de master de l'Université de Yale en 1997. Le projet s'est arrêté après le diplôme de l'étudiant et le logiciel n'a que peu été utilisé pour des applications sur le terrain.

Cependant, MatchMaker! apportait des réponses à la plupart des problèmes de FaST : il possédait une base de données relationnelles intégrant une nomenclature des flux de matière et d'énergie. La base de données était également liée à la classification des activités économiques américaine (codes SIC) et pouvait contenir des données systématiques ou déductives, permettant la modélisation de systèmes industriels existants ou virtuels. Le programme était également accessible à plusieurs acteurs par l'intermédiaire d'une interface multi-utilisateurs (Brown, Gross et al. 1997).

3.1.2.4 *ISIS et Presteo*

En 2001, l'Université de technologie de Troyes (UTT), en partenariat avec électricité de France (EDF) et le ministère français de la recherche, a initié un programme de recherche dans le domaine de l'écologie

³⁰ <http://www.umberto.de>, site consulté le 9 mai 2010.

³¹ <http://www.iuwa.de>, site consulté le 9 mai 2010.

industrielle. Un logiciel de gestion de base de données, ISIS (Industries et Synergies Inter-Sectorielles), a été développé dans le but de regrouper des informations issues de la littérature sur les flux de matière de différents secteurs industriels et d'identifier les activités économiques d'un territoire selon la nomenclature des activités économiques française (codes NAF). La première fonctionnalité d'ISIS permet de détecter des symbioses industrielles entre deux codes NAF en s'appuyant sur des données déductives contenues dans sa base de données. La deuxième cherche ensuite dans la liste des activités géoréférencées d'un territoire les entreprises correspondant aux codes identifiés et les représente sur une interface cartographique.

Testé sur le territoire de l'Aube, les principaux avantages d'ISIS sont d'intégrer une nomenclature des flux de matière performante réduisant le nombre de faux positifs et de permettre d'élargir une étude à l'ensemble des activités économiques d'un territoire avant d'en impliquer les acteurs (Adoue 2004).

En se basant sur les résultats obtenus avec ISIS, le bureau de conseil en écologie industrielle Systèmes Durables Sàrl a développé dès 2005 un second outil, nommé Presteo. Son objectif est de mettre à disposition des organes de gestion du territoire, et en particulier des zones industrielles, un outil de détection de symbioses industrielles basé sur une approche systématique, soit l'audit des flux entrants et sortants des entreprises. Le logiciel peut également être utilisé avec des données déductives. Développé sous forme d'une interface web, il permet un accès multi-utilisateurs. Il intègre une nomenclature très développée, basée sur celle d'ISIS, et possède un script de détection basé sur la comparaison de chaînes de caractères. En ce qui concerne les fonctions d'aide à la décision, il permet de calculer la distance séparant deux entreprises, mais il n'est pas pourvu d'une interface SIG (Adoue 2007; Massard, Adoue et al. 2007).

Presteo a été utilisé entre 2006 et 2009 par le groupe de travail Ecosite du canton de Genève (Chapitre 4). La principale faiblesse identifiée lors de son utilisation réside dans le bruit de fond important généré par le script de détection. Le nombre de faux positifs s'est révélé être très important. L'analyse des résultats et l'identification des synergies prometteuses nécessitent donc l'intervention d'un expert de l'optimisation des flux de matière et d'énergie. Le logiciel et l'expert ont cependant permis de détecter 17 potentiels de synergies parmi les 19 entreprises partenaires du projet en 2005 (Adoue 2005). Leur analyse est intégrée dans les réflexions sur la faisabilité et la pertinence des symbioses industrielles dans le contexte suisse développées au Chapitre 4. Actuellement, Presteo est utilisé en France dans plusieurs projets pilotés par Systèmes Durables.

3.1.2.5 *Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners (CRISP) et Regional Economic Development through Intelligence Based Industrial Symbiosis (RED IBIS)*

Le National Industrial Symbiosis Programme (NISP) au Royaume-Uni, est le premier programme de symbioses industrielles actif à l'échelle d'une nation. Le territoire est partagé en 12 bureaux régionaux,

regroupant chacun une équipe d'experts en l'environnement, en l'énergie, et en gestion des déchets travaillant en collaboration avec les pouvoirs publics locaux. Sa structure et son financement ont été présentés en détail au Chapitre 1.

Les interactions entre régions fonctionnent de la manière suivante : chaque équipe agit de manière indépendante mais les résultats obtenus, prometteurs ou non, sont ensuite disséminés dans les autres régions par l'intermédiaire de la base de données et d'échange d'informations CRISP (Core Resource for Industrial Symbiosis Practitioners). Cette interface de gestion de base de données, accessible via internet à l'ensemble des experts du programme, a pour objectif de faciliter le transfert d'information entre les experts des différentes régions tout en servant de support pour le stockage et la gestion des données collectées sur le terrain. Ses principales fonctionnalités sont la gestion des contacts, la gestion des étapes de mise en œuvre des projets de symbioses industrielles, le reporting, l'accès à une base de données bibliographiques dans les domaines pré-cités. Une fonctionnalité déterminante est de centraliser et de rendre accessible les retours d'expérience des experts à l'ensemble des utilisateurs. CRISP se démarque ainsi des autres logiciels par son orientation vers la coordination d'un réseau d'experts et non la modélisation de systèmes industriels dans le but de détecter de nouvelles symbioses industrielles.

Le succès du NISP est indéniable. En 2007, 243 entreprises participantes étaient parties prenantes dans 307 symbioses industrielles, permettant des économies chiffrées en centaines de millions de livres et en millions de tonnes détournées de la mise en décharge (Mirata 2004; Paquin et Howard-Grenville 2009). La méthodologie de terrain, intégrant CRISP, est aujourd'hui utilisée pour réaliser des projets au niveau international.

Récemment, le NISP a amélioré les fonctionnalités de CRISP en le liant à une interface SIG permettant la localisation des flux de matière et d'énergie et en particulier les sources de déchets. Le programme RED IBIS (Regional Economic Development through Intelligence Based Industrial Symbiosis) allie détection de symbioses industrielles, partage d'informations et planification territoriale (NISP 2009).

3.1.2.6 *Industrial Ecology Planning Tool (IEPT)*

Traiter toutes les familles de flux dans un seul programme représente un défi important et à tendance à diminuer le niveau de précision et la performance de certaines fonctionnalités. Ainsi, certains logiciels se sont concentrés sur une seule famille de flux. Le logiciel IEPT, développé par Carolyn Nobel à l'Université du Texas dans le cadre d'un projet de master achevée en 1998, s'attaque à la problématique de la réutilisation de l'eau, impliquant de nombreuses contraintes physico-chimiques. Il permet la modélisation et l'optimisation de réseaux d'eau selon les principes de l'écologie industrielle (approvisionnement et réutilisation). Equipé d'une interface SIG pour la visualisation et l'analyse du réseau, son objectif est de proposer des solutions justifiables techniquement et économiquement.

Le logiciel développé par Nobel a été utilisé dans la zone industrielle de Baytown, à Pasadena, Texas. La modélisation a permis d'imaginer un réseau viable économiquement qui permettait de réduire de 90%

l'utilisation d'eau potable et de réduire les coûts de 20% (Nobel 1998; Nobel et Allen 2000). Le logiciel ne semble plus être utilisés aujourd'hui.

3.1.2.7 *Outil d'optimisation des systèmes industriels agricoles*

De la même manière, un logiciel de détection particulièrement performant a été développé dans le domaine des co-produits de l'agriculture et de la biomasse par le Georgia Institute of Technology, à Atlanta, Etats-Unis. La méthodologie développée sur la base d'une interface cartographique, permet de localiser les sources (sortants) et les puits (entrants) de biomasse. La mise en œuvre se fait en alliant un modèle mathématique de programmation linéaire aux SIG. Le modèle développé permet de filtrer les potentiels de symbioses industrielles et d'analyser le positionnement optimal de nouvelles activités. En plus du recours aux SIG, utilisés pour réduire les risques environnementaux, l'interface permet d'optimiser la configuration du système par l'intermédiaire d'une analyse des coûts maximisant le bénéfice.

La méthodologie développée a été appliquée à la filière de la cacahuète dans l'Etat de Géorgie, aux Etats-Unis. L'intégration d'une activité de pyrolyse pour la valorisation des cosse a été comparée aux filières de valorisation comme fertilisant ou pour la nutrition animale (Özyurt et Realf 2002).

3.1.2.8 *Ecosolvents*

L'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich a développé un logiciel mono-utilisateur, appelé Ecosolvent, permettant d'évaluer la performance environnementale des solutions de valorisation des solvants usagés. L'algorithme du programme permet de comparer différentes filières en fonction du type de molécule et des taux de mélange et d'impureté, dans le but d'énoncer des recommandations sur la valorisation optimale, principalement incinération, distillation ou réutilisation en station d'épuration. La comparaison des scénarii est basée sur la méthodologie de l'analyse de cycle de vie et permet d'utiliser plusieurs méthodes de quantification des impacts environnementaux, comme Eco-indicator 99, la demande d'énergie cumulée ou l'impact sur le réchauffement climatique (Capello, Hellweg et al. 2007).

Ecosolvent est donc un logiciel d'ACV se focalisant sur l'analyse des filières de valorisation d'un type de substance spécifique. Nous mentionnons ce logiciel pour illustrer les besoins d'outils d'analyse des impacts environnementaux pour soutenir les prises de décision liées à la détection et à la mise en œuvre des symbioses. L'absence d'interface SIG fait que le programme ignore certains paramètres comme l'existence d'une installation de valorisation à proximité des sources détectées et les contraintes logistiques qui doivent être étudiées séparément par l'expert.

Le logiciel est en libre accès sur le site internet du groupe Sicherheits- und Umwelttechnik de la Faculté de chimie et des biosciences appliquées de l'EPFZ³².

³² <http://www.sust-chem.ethz.ch/tools/ecosolvent>, site consulté le 5 juin 2010.

3.1.2.9 *EnerGIS*

Le logiciel EnerGIS a été développé par le Laboratoire d'Energétique Industrielle (LENI) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Son objectif est de modéliser les besoins en énergie d'un territoire, principalement en milieu urbain (à l'échelle du quartier), afin de détecter des potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique et de promouvoir l'utilisation des ressources renouvelables endogènes. EnerGIS, basé sur les principes de l'analyse Pinch et de l'intégration énergétique permet de classer et de quantifier les besoins énergétiques des bâtiments d'après leur fonction (données en kWh/m²) et de les représenter par l'intermédiaire d'une interface SIG. Le programme permet une analyse et une modélisation très détaillées considérant plusieurs technologies de production et de transformation d'énergie. Il permet ainsi de relier les besoins aux énergies renouvelables disponibles localement et de comparer des scénarios de production centralisés ou décentralisés, d'étudier les transferts d'énergie (par l'intermédiaire de pompes à chaleur) et de dimensionner des réseaux d'échange de chaleur (Girardin, Marechal et al. 2010).

EnerGIS est donc un programme d'aide à la décision pour la planification énergétique territoriale. Aucun des outils décrits jusqu'à présent et intégrant l'ensemble des familles de flux n'est aussi détaillé que EnerGIS pour analyser un territoire de manière précise, en se basant sur des données systématiques et déductives. Cependant, EnerGIS reste un outil expert et mono-utilisateur. Son intégration dans un logiciel de partage de l'information et traitant l'ensemble des flux de matière pourrait faciliter les discussions entre les acteurs d'un territoire.

Si le programme lui-même ne semble pas être disponible gratuitement, une description technique détaillée est disponible sur le site internet du LENI³³.

3.1.3 Motivations pour la création d'un nouveau logiciel intégrant les SIG

Depuis 15 ans, de nombreux projets et logiciels destinés à détecter et à promouvoir les symbioses industrielles ont vu le jour dans plusieurs régions du monde avec plus ou moins de succès. Cependant, aucun des programmes que nous avons étudié ne s'est révélé capable d'appréhender l'ensemble de la problématique de la gestion des ressources et des co-produits sur un territoire.

Premièrement, la totalité des logiciels ont été développés dans un contexte particulier et appliqué sur un espace géographique restreint. De plus, la plupart des outils ont été développés et appliqués à un petit nombre de cas d'étude. L'échelle d'action varie de la zone industrielle à la nation. Seuls CRISP, RED IBIS et Presteo sont aujourd'hui utilisés au niveau international. Deuxièmement, la majorité des outils développés dans les années nonante a aujourd'hui été abandonnée sans qu'aucun n'ait marqué significativement l'essor des symbioses industrielles à l'échelle mondiale. La majorité est aujourd'hui

³³ <http://leniwiki.epfl.ch/index.php/Energis/Manual#ENERGIS>, site consulté le 5 juin 2010.

indisponible, soit parce que les projets sont terminés, soit parce qu'ils appartiennent à des sociétés privées. La nouvelle génération semble suivre un cheminement différent et plusieurs programmes sont aujourd'hui disponibles à la vente ou soutiennent un accompagnement technique. Troisièmement, les outils décrits ont tous été développés dans le but de soutenir et de favoriser l'échange d'informations ou de faciliter la détection de symbioses industrielles. Ils sont le plus souvent soit mono-utilisateurs, soit restreints à une famille de flux, soit détachés de la composante spatiale.

Ainsi, l'interface web Presteo utilisé pour le projet pilote de Genève entre 2005 et 2008 propose une architecture de base de données pour stocker des informations sur les flux et détecter des opportunités de symbioses industrielles. Cependant, la base de données seule s'est avérée insuffisante pour conseiller les acteurs du projet sur la faisabilité et la pertinence de certaines symbioses ou pour appréhender l'ensemble des composantes du territoire considéré. Le lien avec des informations de type spatiales s'est révélé être une nécessité.

Presteo a cependant une autre qualité. Il possède une interface multi-utilisateurs qui permet aux entreprises partenaires d'un projet d'accéder directement aux formulaires de collecter des données via une simple page internet. L'entreprise peut ensuite générer sa propre recherche d'opportunités parmi l'ensemble des entreprises participant au projet. Cette fonctionnalité influence fortement les rapports entre le coordinateur du projet et les entreprises. Son avantage est de rendre accessible les résultats à l'ensemble des partenaires, renforçant ainsi la communication et la transparence. Cependant, il ne s'agit pas ici ni d'une interface de communication pour l'aide à la décision ni d'un moyen pour les acteurs d'un projet de partager des informations autre que les pistes de symbioses.

Ces constats permettent d'aiguiller les choix conceptuels et techniques liés au développement d'un nouvel outil dans le contexte suisse, mais adapté au contexte international. Le premier objectif de cette section est donc d'expliquer les motivations concernant le développement d'un outil permettant de soutenir des projets de symbioses industrielles en ancrant géographiquement les informations concernant les échanges existants et potentiels. Le deuxième objectif est d'étudier le potentiel de cet outil pour remplir le vide existant entre la gestion des ressources et des flux de matière et d'énergie et l'aménagement du territoire.

Le travail de terrain que nous avons mené en Suisse romande entre 2006 et 2010 a révélé la nécessité pour les acteurs d'un projet de disposer d'un outil permettant de centraliser des informations sur les ressources naturelles et les flux de matière et d'énergie. En particulier, les audits d'entreprise nécessaires à l'organe de coordination du projet pour détecter et mettre en œuvre des symbioses, ainsi que l'intégration d'informations déductives sur les bonnes pratiques ou issues de la littérature, impliquent le stockage et le traitement d'une masse considérable de données spatiales et non spatiales. Les systèmes d'information du territoire des cantons romands intègrent à l'heure actuelle très peu de données relatives aux flux de matière et d'énergie. Le canton de Genève est le plus avancé dans ce domaine (Chapitre 4). En collaboration avec les cantons, nous avons identifié plusieurs besoins relatifs aux flux de matière et d'énergie et qui constitueront les hypothèses de développement de la nouvelle interface.

Premièrement, il convient de faciliter l'intégration de cette nouvelle composante dans ces systèmes d'information, ce qui requiert la création d'une base de données destinée à accueillir et à traiter les informations sur les ressources naturelles et les mouvements et transformation de flux de matière des activités économiques. Celle-ci permettra d'accumuler des données systématiques et déductives dans le but de faciliter leur accès et leur traitement. Une nomenclature adaptée, rigoureuse, mais flexible devra être utilisée pour renforcer la pertinence lors des traitements.

Comme expliqué dans la Section 2.4, la problématique de la détection de symbioses industrielles est étroitement liée à des contraintes d'origines spatiale et géographique. La mise en place d'une collaboration entre plusieurs entreprises induit en effet une interaction avec certains éléments et infrastructures du territoire environnant. Les acteurs d'un projet doivent disposer de moyens adéquats pour étudier la faisabilité géographique d'une solution et pour évaluer ses aspects légaux, économiques, environnementaux et logistiques. De manière générale, la mise en place d'une synergie implique de connaître :

- La position d'une ou de plusieurs entreprises par rapport aux autres éléments du territoire pour évaluer les contraintes géographiques, comme la distance séparant deux installations et détecter de nouvelles opportunités ;
- L'existence de ressources endogènes dans le sous-sol (eau, énergie, matières) pour enrichir les opportunités de substitution ;
- La proximité et la capacité des réseaux routier et ferroviaire, ainsi que des réseaux d'approvisionnement en eau, gaz et chaleur, pour les aspects logistiques ;
- L'occupation du sol et du sous-sol ainsi que l'état foncier des parcelles voisines afin d'évaluer la possibilité de mettre en place de nouvelles infrastructures de transfert comme des conduites, des plateformes de collecte et de traitement mutualisé ou des infrastructures partagées.

Le deuxième besoin identifié concerne la nécessité de pouvoir lier des informations non spatiales contenue dans une base de données avec les données spatiales du territoire. La base de données doit donc être compatible avec les logiciels et les interfaces SIG.

Un besoin de communication entre certains services de l'administration publique et à destination du grand public a été identifié en Suisse romande et lors des visites de projets effectuées à travers le monde entre 2006 et 2010. Les représentations cartographiques et schématiques du cheminement des ressources et des symbioses industrielles existantes ou potentielles sont des éléments esthétiques qui recellent un fort potentiel de séduction.

De plus, les conclusions du Chapitre 2 ont mis en évidence le lien entre promotion économique, aménagement du territoire et protection de l'environnement dans le domaine de l'optimisation de l'usage des ressources. Une interface accessible à l'ensemble des décideurs de ces trois domaines apparaît comme une opportunité pour renforcer ce lien. En présentant les bonnes pratiques existantes et en fournissant des informations sur les flux de matière, en même temps que sur l'occupation du sol, sur les

zones de développement ou le cadastre foncier, elle permettrait de mieux intégrer la dimension des flux de matière dans les processus de décision.

Le troisième besoin identifié est la nécessité de disposer d'un logiciel ou d'une interface qui permet aux différents types d'acteurs d'accéder à plusieurs niveaux d'information : audits, symbioses potentielles, organisation du territoire. Les acteurs du projet peuvent également avoir besoin d'entrer de nouvelles données relatives à l'état d'avancement des projets en cours, comme le permet CRISP (Section 3.1.2.5). Le public cible d'un tel logiciel inclut l'ensemble des acteurs impliqués dans le développement du territoire : personnel des services publics, consultants, organes de recherche et pourquoi pas les entreprises elles-mêmes.

Certaines de ces données peuvent cependant être sensibles ou confidentielles. Malgré l'orientation de ce travail vers une volonté de mieux partager l'information, leur diffusion doit parfois être restreinte. Ainsi, le présent travail n'a pas pour objectif de créer une communauté virtuelle de personnes autour de la problématique des symbioses industrielles mais de faciliter l'accès aux informations sur l'organisation de flux de matière pour certains groupes de personnes et en particulier les représentants de l'administration publique. La visualisation des puits et sources de matière et d'énergie, ainsi que les symbioses industrielles possibles sont des éléments esthétiques importants qui facilitent la communication entre acteurs. La représentation cartographique des échanges possibles représente un atout pour motiver les acteurs économiques.

Finalement, les conclusions de la revue de littérature indiquent que la tendance actuelle consiste à développer un outil pour chaque territoire désireux d'avancer vers une meilleure prise en compte des ressources. De la même manière la collaboration dans ce domaine entre les cantons romands n'en est qu'à ses débuts et la faible compatibilité technique entre les systèmes d'information cantonaux complique encore la tâche. La création d'un logiciel compatible avec le plus grand nombre de sources de données et ainsi exploitable partout dans le monde avec pour seule contrainte la disponibilité des données spatiales constitue la quatrième motivation.

3.2 LA BASE DE DONNEE ET SON INTERFACE DE GESTION SYMBIOGIS

3.2.1 Contexte et historique

L'interface SymbioGIS a été développée dans le cadre de la présente thèse de doctorat, en collaboration avec le Laboratoire de Système d'Information Géographique (LaSIG) de l'Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) et du groupe de travail Ecosite de l'Agenda 21 du canton de Genève (Chapitre 4).

Dès 2006, l'Université de Lausanne et Ecosite se sont dotés d'une licence du logiciel Presteo développé par la société Systèmes Durables et le Dr. Cyril Adoue (Adoue 2007). Systèmes Durables et l'Université de Lausanne ont entretenu une collaboration pour le développement des SIG en lien avec Presteo entre 2006 et 2008 (Massard, Adoue et al. 2007). Le travail de master d'Anna Plancherel en 2006 allait dans ce sens (Plancherel 2006).

A la fin de la collaboration, nous avons décidé d'approfondir ces réflexions à travers le développement d'un nouvel outil dont l'architecture serait orientée vers les SIG. Pour ce faire, la collaboration avec le LaSIG s'est poursuivie. Albin Viquerat, étudiant de master à l'Ecole Polytechnique et Fédérale de Lausanne, a réalisé un travail de master qui a posé les bases de SymbioGIS (Viquerat 2008). Il a ensuite rejoint l'IPTEH pour un service civil d'une durée de 3 mois qui lui a permis de continuer son travail de développement. SymbioGIS, première version, a été présenté lors de deux conférences internationales en 2009 (Massard et Erkman 2009; Massard, Viquerat et al. 2009).

Dans la deuxième moitié de 2009, le Dr. Basile Schaeli a effectué un service civil de 3 mois à l'IPTEH. Ingénieur informaticien EPFL de formation, le Dr. Schaeli a modifié l'architecture de la base de données et les requêtes de détection de symbioses industrielles afin de simplifier l'utilisation de l'interface et de permettre une meilleure analyse des résultats. C'est cette dernière version (décembre 2009) de SymbioGIS qui est présentée ici. Finalement, Laetitia Carles, étudiante de master en science et ingénierie de l'environnement à l'EPFL, a participé à tester la robustesse de la détection de synergies de SymbioGIS (Carles 2009).

3.2.2 Description des fonctionnalités attendues

Les conclusions de la revue de littérature de la Section 3.1.3 ont mis en évidence la nécessité de créer un nouveau logiciel d'aide à la décision pour les entreprises et la planification territoriale intégrant les dimensions flux de matière et ressources naturelles. Pour soutenir de manière adéquate le travail de terrain, celui-ci va intégrer les fonctionnalités suivantes :

1. Base de données (BD) : Le stockage et la hiérarchisation de données concernant les activités économiques d'un territoire et leurs flux de matière et d'énergie, ainsi que leurs caractéristiques

- techniques (données systématiques issues des audits en entreprises ou déductives, issues de la littérature). Les types d'information collectés, incluant les paramètres techniques et logistiques ont été détaillés dans le Chapitre 2, Section 2.3. Cette étape implique le recours à une nomenclature des flux appropriée ;
2. BD : Le stockage de données sur les bonnes pratiques existantes en provenance de la littérature (données déductives) ou de projets déjà mis en œuvre sur le territoire considéré (données systématiques) afin de disposer d'une liste de priorités d'action destinée à faciliter la diffusion des projets à fort potentiel ;
 3. Traitement BD : Un script permettant la détection de symbioses industrielles potentielles à partir des données décrites au points 1 et 2 et attribuées à des activités économiques identifiables individuellement ;
 4. Traitement BD : Un script permettant d'assigner les données systématiques ou déductives à l'ensemble des entreprises et infrastructures d'un secteur d'activité afin de procéder à des recherches déductives et générales sur le système industriel considéré en fonction de l'organisation des activités économiques ;
 5. Traitement BD : Une interface offrant la possibilité d'introduire des contraintes sur les données afin de préciser les requêtes et de permettre l'analyse des critères de faisabilité et de pertinence définis dans le Chapitre 2, Section 2.4. Dans un premier temps, si le logiciel n'intègre pas directement l'analyse de faisabilité et de pertinence, il devra permettre aux utilisateurs d'accéder facilement aux données nécessaires ;
 6. Relation BD /SIG : Une interface cartographique permettant d'identifier et d'ancrer géographiquement les puits (consommation) et les sources (déchets, rejets de chaleur, etc.) de ressources en lien avec la visualisation de données spatiales du territoire ;
 7. Relation BD /SIG : Un script permettant de déterminer un emplacement optimum pour une nouvelle activité économique en intégrant des contraintes de types spatiales et non spatiales en relation avec les flux de matière ;
 8. Relation BD /SIG : Une interface cartographique et de gestion de la base de données, multi-utilisateurs, intégrant l'ensemble des informations disponibles pour permettre aux acteurs du projet de communiquer entre eux et de prendre des décisions dans leurs domaines de compétence respectifs ;
 9. BD : L'intégration de champs dans la base de données permettant aux acteurs de gérer les avancées d'un projet à partir de la détection d'une opportunité. L'objectif est de mémoriser les données relatives aux analyses de faisabilité et de pertinence, de valider les étapes de mise en œuvre du projet, et d'assurer le monitoring des projets réalisés ;
 10. Relation BD /SIG : Une représentation cartographique claire de l'écosystème industriel créé et de son évolution pour la communication à destination du grand public.

Il existe cependant certaines contraintes à prendre en compte. Le programme développé dans le cadre de cette recherche n'est pas destiné à remplacer certains outils et interfaces déjà utilisés par les services d'information du territoire et par certaines activités économiques. Son objectif est de centraliser l'information dans le but de la rendre plus accessible et plus facilement exploitable. De plus, il n'est pas nécessaire de partir de zéro dans tous les domaines concernés. Il semble plus pertinent de développer une interface compatible et complémentaire avec d'autres outils intégrant déjà un savoir faire important. Dans le contexte suisse romand, les logiciels EnerGIS de l'EPFL et Ecosolvents de l'EPFZ apparaissent comme les plus intéressants à ce stade.

3.2.3 Choix techniques

3.2.3.1 Conception de l'architecture

Les fonctionnalités souhaitées et la prise en compte des contraintes imposent certains choix architecturaux. Une interface multi-utilisateurs comprenant une base de données liée à un système d'information géographique nous est apparue comme une solution pertinente. La manière la plus adéquate de développer ces fonctionnalités consiste ainsi en un ensemble regroupant une base de données, une interface SIG expert développée dans un logiciel SIG spécialisé et une interface SIG grand public accessible via internet. En effet, les premiers choix conceptuels parlent en faveur du développement d'une base de données indépendante et non directement développée à l'intérieur d'un logiciel SIG. Cette solution a pour avantage une grande flexibilité. Plusieurs programmes et interfaces, destinés à des acteurs aux objectifs et aux connaissances techniques différentes, pourront ainsi avoir accès aux données contenues dans la base. Premièrement, un programme SIG spécialisé, comme ArcGIS ou Manifold, pourra solliciter la base de données pour accéder aux informations nécessaires afin de les exploiter en lien avec ses fonctionnalités propres. Deuxièmement, SymbioGIS souhaite mettre de l'information à disposition des décideurs et du grand public pour la sensibilisation à la gestion des ressources et l'aide à la décision. La création d'une interface cartographique accessible au grand public via internet permettra de faciliter la communication et de motiver les acteurs économiques du territoire (Figure 41).

L'architecture présentée à la Figure 41 constitue un objectif destiné à rendre le système plus performant à terme. Les éléments présentés ici concernent le développement de la base de données et de l'interface internet destinée au grand public et intégrant les SIG. Ils constituent la base de l'outil SymbioGIS.

Les dix fonctionnalités énoncées ci-dessus constituent l'objectif à atteindre à long terme pour disposer d'un outil complet pour soutenir l'émergence de symbioses industrielles, et plus largement des démarches d'éco-efficacité, sur tout territoire disposant de données géoréférencées. La suite de ce chapitre détaille le développement de l'outil pilote destiné à évaluer la faisabilité technique d'un tel développement et d'en

tester les fonctionnalités. Dans son état actuel, SymbioGIS contient huit (dont cinq partiellement) des dix fonctionnalités identifiées.

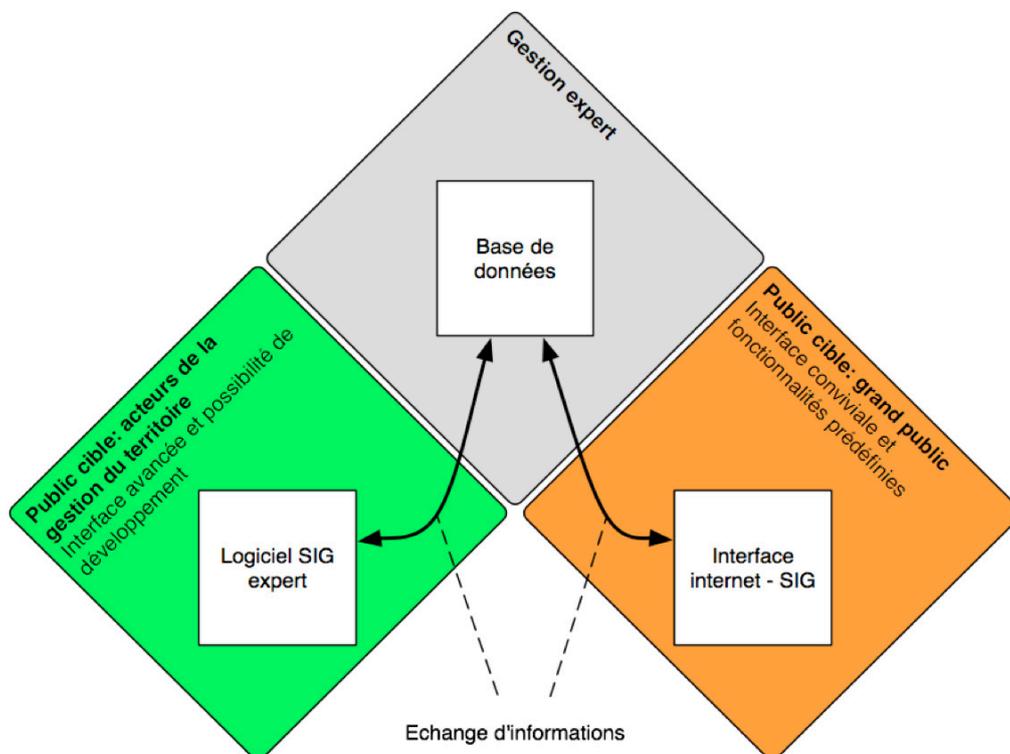


Figure 41 : Proposition d'architecture pour la création d'une interface d'optimisation de l'usage des ressources et de détection de symbioses industrielles intégrant les SIG. Source : auteur.

3.2.3.2 Outils techniques

Cette section détaille les choix techniques pour le développement de la base de données, de son interface de gestion et de l'interface cartographique. Pour répondre aux considérations énoncées dans la section précédente, l'interface choisie est un support internet et le système de gestion de la base de données (SGBD) est PostgreSQL. Cette solution offre la plus grande flexibilité en termes de développement, de gestion et d'accès. L'intégration d'une interface cartographique (via un MapServer) dans le navigateur internet est moins aisée, mais recèle un fort potentiel pour la communication et la sensibilisation.

La Figure 42 décrit le fonctionnement d'une architecture client-serveur web avec une base de données et l'intégration d'un MapServer. Le cœur du système est le serveur web Apache, qui sert d'intermédiaire entre le client (le navigateur Internet) et la base de données. C'est une solution « libre » et très répandue. Le système de gestion de base de données apparaissant sur le schéma est PostgreSQL (PgSQL), lui aussi appartenant à la famille des logiciels « libres ». Le module PostGIS ajoute la gestion des objets

géographiques et PostgreSQL peut alors être employé comme base de données spatiale principale pour les SIG. Pour permettre la communication entre le moteur Apache et la base de données PostgreSQL, le langage PHP est utilisé. Ce langage de script fonctionnant côté serveur a été conçu spécialement pour être utilisé sur internet et peut dialoguer avec pratiquement tous les SGBD. Finalement, MapServer est une application qui permet de générer des cartes à partir de données spatiales diverses. Les paramètres décrivant la présentation des cartes sont regroupés dans des « mapfiles » (fichier .map). Des cartes peuvent donc être générées dans des pages internet et ainsi permettre l'affichage, mais aussi l'interrogation ou la modification d'images cartographiques.

L'avantage principal de ce système est qu'il est initialement orienté vers la gestion d'une base de données. L'insertion, la suppression ou la modification de données spatiales et non spatiales est effectuée par des requêtes SQL transmises en PHP à PostgreSQL. Etant donné qu'il s'agit de gérer une base de données évolutive, c'est un avantage non négligeable. De plus, la création de formulaires d'insertion et de manipulation des données en PHP est relativement aisée et offre une grande souplesse (Viquerat 2008).

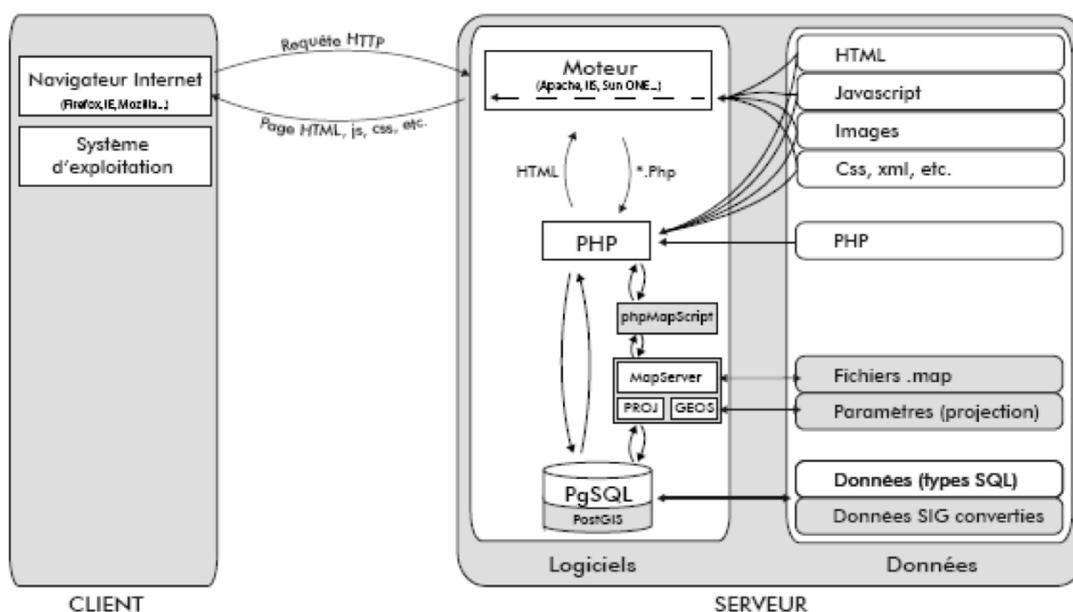


Figure 42 : Le système client-serveur. Source : <http://www.portalsig.org>

A partir de l'implémentation initiale, ces choix techniques ont été maintenus tout au long du processus de développement : la combinaison Apache + PHP + PostgreSQL, de même que le MapServer (*ms4w*) n'a jamais été remise en question. Sous l'impulsion du Dr. Schaeli, la structure de la base de données a néanmoins subi plusieurs modifications destinées à prendre en compte les développements du Chapitre 2

et à optimiser son fonctionnement. En particulier, la BD a été optimisée afin de répercuter immédiatement toute modification des données sur les tables de résultats. En lien avec l'interface web, l'utilisation de Javascript et d'AJAX a également permis de rendre la navigation et la manipulation plus dynamique.

Lors de futurs développements, la création d'un script permettant d'exploiter les données de la base depuis un logiciel SIG comme ArcGIS ou Manifold viendra compléter l'architecture proposée à la Figure 41. A partir de là, les nombreuses possibilités inhérentes aux SIG seront disponibles. Cette solution reviendra finalement à profiter à la fois des avantages du système web serveur en ce qui concerne la gestion de la base de données, mais aussi à conserver les fonctionnalités de géotraitement d'un SIG.

3.2.4 Inventaires des données disponibles

Une procédure d'audit des entreprises basée sur l'analyse de flux de matière et destinée à collecter des informations sur leur consommation de ressources et leurs co-produits a été présentée dans le Chapitre 2, Section 2.3. Celle-ci inclut 26 champs et paramètres techniques et logistiques utiles à l'évaluation des pistes d'optimisation qui constituent les données et attributs non spatiaux. Ces informations doivent donc être mises en lien avec les nombreuses autres données relatives à l'organisation du territoire considéré. Elles peuvent être non spatiales, comme des données supplémentaires sur les activités économiques, ou spatiales, permettant d'augmenter la compréhension du territoire, dans le but d'enrichir les processus d'aide à la décision.

Pour le développement d'une version pilote de SymbioGIS, la recherche de données est basée sur les informations disponibles sur le territoire du canton de Genève. Les principales sources sont le Département de l'aménagement, de la solidarité et de l'emploi (DARES) et en particulier le Service d'information du territoire (SITG). Le DARES possède une base de données complète et géoréférencée des activités économiques du territoire incluant des attributs comme la raison sociale, l'adresse, l'activité principale, le secteur d'activité selon la nomenclature fédérale (codes NOGA), des classes renseignant sur le nombre d'employés et le géoréférencement. L'étude du catalogue de données du SITG a permis d'identifier les couches thématiques de données spatiales intéressantes pour la détection de symbioses industrielles. Elles sont listées en quatre catégories dans le Tableau 12 : fonds de carte, limites administratives et occupation du sol, données relatives aux infrastructures et données renseignant sur les ressources endogènes.

Tableau 12 : Liste des couches thématiques géoréférencées disponibles auprès du SITG du canton de Genève et pertinentes pour une intégration dans SymbioGIS. Source : auteur.

Nom	Type	Caractéristique
Carte nationale 1:25000	Raster	Fond de carte
Plan d'ensemble 1:2500	Raster	Fond de carte
Orthophotos	Raster	Fond de carte
Limites communales	Vecteur	Limites administratives et occupation du sol
Zones industrielles	Vecteur	Limites administratives et occupation du sol
Zones industrielles FTI	Vecteur	Limites administratives et occupation du sol
Zones de développement	Vecteur	Limites administratives et occupation du sol
Zone agricole	Vecteur	Limites administratives et occupation du sol
Bâtiment hors sol	Vecteur	Infrastructures
Graphe du réseau routier	Vecteur	Infrastructures
Graphe du réseau ferroviaire	Vecteur	Infrastructures
Géoréférencement des entreprises	Vecteur	Infrastructures
Ouvrages de traitement des eaux	Vecteur	Infrastructures
Stations de pompage des eaux	Vecteur	Infrastructures
Cours d'eau	Vecteur	Ressources endogènes
Nappes souterraines et superficielles	Vecteur	Ressources endogènes
Potentiel géothermique	Vecteur	Ressources endogènes
Plan directeur des gravières	Vecteur	Ressources endogènes

3.2.5 Création de la base de donnée

3.2.5.1 *Le modèle conceptuel*

Un modèle conceptuel a pour but de modéliser l'architecture et l'organisation des données dans la BD en utilisant un formalisme entité-relation. Le modèle entité-relation distingue les entités (tables), à distinguer des entités économiques, et les relations entre ces entités. Chacune des entités du modèle (objet ou association) peut être caractérisée par un ou plusieurs attributs (champs contenus dans la table). D'autre part, les cardinalités associées aux relations permettent de spécifier les nombres minimum et maximum d'occurrences d'une association.

Le modèle conceptuel de la base de données SymbioGIS est présenté à la Figure 43 à l'aide du langage entité-relation étendu. A titre d'exemple, une entreprise (ou entité économique) peut produire de 0 à n produits. Un produit peut être engendré par une à n entreprises. L'entreprise est caractérisée par quinze attributs calqués sur les informations disponibles dans le registre du commerce et, dans le cas de Genève, auprès du DARES. L'identifiant, en gras, est un attribut qui doit avoir une valeur unique pour chacun des éléments considérés, soit pour chacune des entreprises dans ce cas précis. Il permet de faire référence sans ambiguïté à une entreprise en particulier. Chaque entreprise consomme et génère entre 1 et n flux entrants et sortants. A chaque flux est attaché de 1 à n composants. Le stockage des informations sur les flux et leurs composants transitant dans les entreprises permettra la création de tables contenant les correspondances issues de la comparaison des chaînes de caractères (symbioses industrielles de substitution et de mutualisation).

3.2.5.2 *Description des entités*

Les entités créées dans la base de données sont détaillées ci-dessous :

Les tables **entreprises**, **produits** et **contacts** permettent à chaque entreprise de bénéficier d'un identifiant propre *id_entreprise*. Les principaux attributs de la table *entreprises* sont la raison sociale, l'adresse, le numéro du registre du commerce, le nombre d'employés et les coordonnées géographiques, permettant un géoréférencement et donc un lien avec des informations de type spatiale. Une entreprise peut produire plusieurs produits, ce qui crée une relation entre les tables *entreprises* et *produits*. Les personnes en charge du projet disposent de contacts au sein des entreprises. Une table *contacts* est donc associée à la table *entreprise*.

La base de données contient ensuite deux entités, **flows** et **components**, contenant des attributs équivalents à ceux des fichiers Excel utilisés pour l'importation des données systématiques, issues des audits de terrain ou déductives.

Les données de flux sont gérées de la façon suivante : la table *entreprises* est mise en relation avec la table *flows*. Il est important de noter qu'un flux, caractérisé par ses attributs et par un identifiant (*id*), ne peut appartenir qu'à une seule entreprise. Un nom de flux peut par contre être utilisé à plusieurs reprises par plusieurs entreprises. La table *flows* contient 35 attributs issus des réflexions sur la collecte des données de la Section 2.3. Ils permettent de caractériser précisément le flux considéré et de stocker les informations nécessaires à l'évaluation de la pertinence environnementale. Les données déductives sont traitées de la manière suivante : lorsqu'un exemple de symbiose apparaît dans une source bibliographique, il est possible de l'associer à un ou plusieurs noms de flux grâce à l'attribut *data_source*. La gestion des composants est régie par les mêmes principes. Les composants sont les constituants des flux. Un flux est composé au minimum d'un composant. De la même manière que pour les flux et les entreprises, un composant (caractérisé par ses attributs et son identifiant) ne peut appartenir qu'à un seul flux, mais un nom de composant peut apparaître à plusieurs reprises. 25 attributs permettent de décrire en détail l'utilisation, les caractéristiques techniques, la provenance et la destination des composants. Un grand nombre d'entre eux est similaire à la table *flows* mais ils permettent d'améliorer le degré de détail. A l'origine, une table permettait d'intégrer la nomenclature des flux et des composants directement dans la base de données. Comme nous ne disposons pas pour l'instant d'une nomenclature adaptée et aboutie, cette table a été supprimée et le choix des noms de flux et de composants ont été laissés au savoir faire de l'expert en charge de l'importation des données via l'importation de fichier Excel.

Les trois dernières tables, ***substitutions***, ***input_mutualisations*** et ***output_mutualisations*** sont destinées à stocker les symbioses industrielles potentielles détectées à partir des flux et des composants contenus dans les tables. Plutôt que de développer un script permettant de créer une nouvelle table sur la base des correspondances, SymbioGIS détecte les correspondances directement dans l'architecture de la base de données en mettant ces tables à jour en temps réel à partir des données introduites. Chaque table correspond à un type de symbioses industrielles (substitution dans le cas d'un échange de co-produits et mutualisation pour les mutualisations d'approvisionnement ou de traitement). Chaque symbiose industrielle potentielle est détectée sous la forme d'une correspondance, appelé également appariement, identifiée de manière unique par un attribut unique *id* attribué lorsque le lien est détecté³⁴. Cette solution a l'immense avantage de maintenir la cohérence entre les données de flux et les correspondances détectées dans l'ensemble de la base et d'assurer l'intégrité des données. Cependant, cela induit des contraintes d'intégrité qui font que la suppression d'un flux a pour conséquence de supprimer les composants associés ainsi que toutes les synergies associées (voir Section 3.3.1). Les attributs de ces entités permettent de caractériser les correspondances en fonction de leur état d'avancement (*status*), de leur faisabilité (*feasibility*) et de la distance séparant les deux entreprises (*distance*).

³⁴ Les trois tables stockent directement les correspondances en identifiant chacune d'entre elles grâce à la combinaison <*flow1*, *flow2*, *component1*, *component2*> puis en leur donnant un identifiant unique *id*

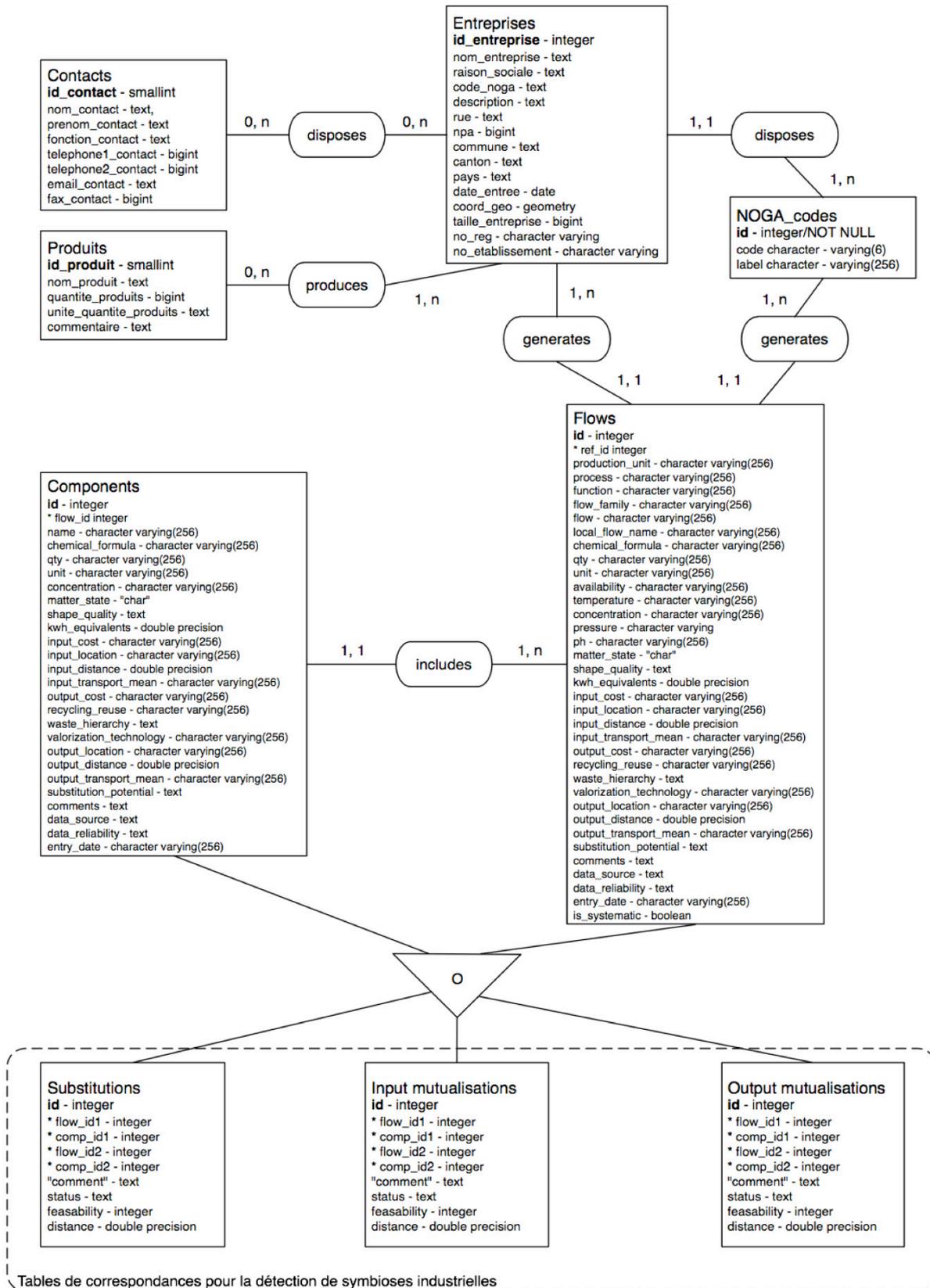


Figure 43 : Schéma entité-relation étendu de la base de données SymbioGIS. Source : auteur et Basile Schaeli selon (Viquerat 2008).

3.3 FONCTIONNALITES DE SYMBIOGIS

La structure de la base de données a été définie il est possible d'y intégrer des données qui s'organiseront en temps réel dans les tables de correspondance destinées à détecter les symbioses industrielles. Le développement des fonctionnalités F 1 à F 10 énoncées à la section 3.2.2 et listées dans le Tableau 13 est discuté dans les sections suivantes.

Tableau 13 : Liste des fonctionnalités de SymbioGIS telles qu'énoncées à la section 3.2.2 et de leur état de développement. Source : auteur.

Fonctionnalité	Description	Développement	Section
F 1	Base de données (DB) : stockage des données systématiques	✓ ✓	3.3.1
F 2	DB : stockage des données déductives et sur les bonnes pratiques	✓	3.3.1
F 3	Traitement DB : script de détection de symbioses industrielles potentielles à partir des données des entreprises	✓ ✓	3.3.2
F 4	Traitement DB : script de détection des correspondances à partir des codes NOGA	✓	3.3.2
F 5	Traitement DB : interface de gestion des contraintes et analyse de faisabilité	✗	-
F 6	Relation DB/SIG : interface cartographique pour visualiser les données spatiales du territoire, les données de flux et les correspondances (3 et 4)	✓ ✓	3.3.3 / 3.3.4
F 7	Relation DB/SIG : script permettant de déterminer un emplacement optimum en intégrant des contraintes spatiales et non spatiales	✓	3.3.4
F 8	Relation DB/SIG : interface multi-utilisateurs intégrant la cartographie et l'accès aux données	✗	-
F 9	DB : intégration de champs pour la gestion de projets	✓	3.3.5
F 10	Relation DB/SIG : représentation cartographique des symbioses industrielles ainsi créés	✓	3.3.3 / 3.3.4

(✓✓) indique un développement abouti, (✓) un développement partiel et (✗) l'absence de développement à l'heure actuelle

Toutes les fonctionnalités n'ont pas pu être développées dans le cadre de ce travail de thèse et certaines feront l'objet de recommandations dans les perspectives de recherche présentées dans la Section 3.4 et dans l'Annexe 5.

3.3.1 Importation, exportation et mise à jour des données (F 1 – F 2)

La procédure d'audit des entreprises et de collecte des flux de matière et d'énergie a été définie dans la Section 2.3. La collecte des données est effectuée à l'aide de fichiers Excel contenant des champs prédéfinis qui deviendront les attributs des tables *flows* et *components*. Il s'agit maintenant de transférer ces données dans la base en renvoyant chaque champ Excel vers son attribut dans la table. Dans la première version de SymbiosGIS, deux formulaires, un pour les entreprises et l'autre pour ses flux associés, permettant l'insertion des données par l'utilisateur avaient été construites avec un fichier HTML directement dans l'interface web. Ce dernier exécutait un script PHP récupérant les champs renseignés et effectuait les modifications demandées dans le SGBD à l'aide de requêtes SQL. Les mêmes formulaires permettaient de mettre à jour et d'exporter les données sous forme de fichier Excel (Viquerat 2008). Cette méthode d'importation, très gourmande en temps, a été modifiée dans la deuxième version de SymbioGIS.

L'utilisation d'Excel pour les audits de terrain suggère de pouvoir importer et exporter directement des bilans flux vers et à partir de ce format. Alternativement, la nécessité d'importer les flux de manière automatique impose certaines contraintes au niveau de l'utilisation d'Excel. L'utilisateur doit en effet impérativement respecter l'ordre des colonnes et le formatage décrit ci-dessous. La solution retenue n'est donc pas la plus souple, mais elle a le grand avantage d'être simple autant dans son implémentation que dans son concept.

3.3.1.1 Importation des données

Le format d'Excel n'étant pas ouvert, les données doivent préalablement être exportées dans un format lisible, en l'occurrence CSV, qui correspond à un format texte où les champs sont séparés par des virgules. Le fichier CSV est ensuite importé dans la base de données via l'interface web. Etant donné que chaque flux peut avoir plusieurs composants et que chacun d'entre eux peut avoir des caractéristiques différentes des flux auxquels ils sont associés, ce choix technique nécessite le respect de certaines règles lors de la création du fichier Excel. Afin que l'importation puisse correctement associer composants et flux, le remplissage des informations doit respecter les contraintes suivantes :

- Si un flux contient un composant unique et que leurs caractéristiques techniques sont les mêmes, alors les champs *flux* et *composant* du bilan de flux doivent tous deux être remplis ;

- Lorsque un *flux* contient plusieurs *composants*, le champ *composant* doit rester vide lors de la description du flux. Chaque ligne suivante dont le champ *flux* est vide représente un composant de ce flux.

Les flux contenus dans chaque bilan sont par ailleurs répartis en deux sections en fonction de l'origine des données. Une distinction est faite entre les données flux issues des audits de terrain (systématiques) et les données issues de la littérature (déductives). La procédure d'importation part du principe que deux sections sont respectivement identifiées par les mots-clés *Flux systématiques* ou *Systematic flows*, et *Flux déductifs* ou *Deductive flows* dans le fichier Excel. L'ordre dans lequel les flux sont listés dans le bilan est donc important pour l'importation, et il est dès lors déconseillé de trier les flux et composants selon différents critères dans Excel.

Lors de l'importation, le bilan de flux est associé soit à une entreprise préalablement créée ou importée dans la table *entreprises*, soit à un code NOGA de la table *NOGA_codes*. Si des flux et des composants sont déjà associés au code NOGA ou à l'entreprise choisie, ils sont préalablement supprimés. Cela implique que toutes les données concernant ces flux doivent être importées à partir d'un même fichier. Des bilans d'entreprise qui seraient éparpillés sur plusieurs feuilles de calcul Excel doivent donc être fusionnés dans le même fichier CSV avant importation.

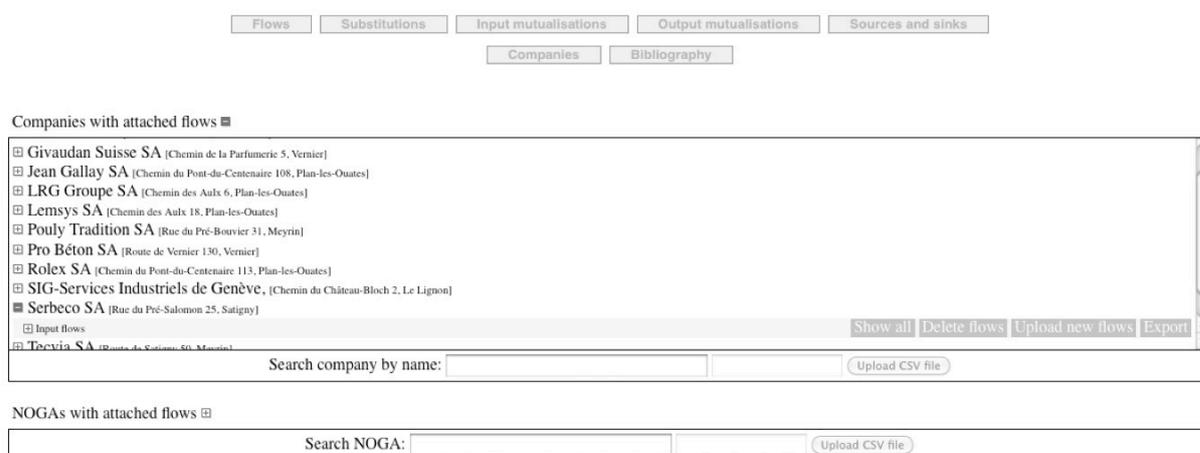


Figure 44 : SymbioGIS – Interface d'importation des données. Source : auteur.

3.3.1.2 Exportation des données

De la même manière, l'exportation d'un bilan de flux s'applique à une entreprise ou à un code NOGA défini. Il n'est pas possible d'exporter uniquement un sous-ensemble des flux ou des composants d'une entreprise, ou d'exporter dans un seul fichier les flux de plusieurs entreprises distinctes. La fonction d'exportation est basique. Elle génère uniquement un fichier CSV sans formatage qui peut ensuite être

mis en forme dans Excel. Les fichiers exportés peuvent par contre être réimportés tels quels ou après modification.

Il est également possible d'exporter les résultats obtenus lors de la détection des synergies afin de les traiter dans un tableur Excel. Le contenu des tables ou d'un sous-ensemble des tables *substitutions*, *input mutualisations* et *output mutualisations* peut être exporté au format CSV de la même manière que les bilans de flux.

3.3.1.3 *Mise à jour d'un flux ou d'un bilan de flux*

L'implémentation actuelle permet de visualiser partiellement un bilan de flux depuis SymbioGIS. Les formulaires HTML ayant été supprimés, l'interface n'autorise pas la modification des flux ou des composants stockés dans la BD. Il est donc nécessaire d'exporter un bilan, puis de le réimporter après avoir effectué les modifications.

L'impossibilité actuelle de modifier un bilan de flux sans effacer et recréer de nouvelles informations a pour effet secondaire fâcheux d'entraîner la perte de toutes les informations associées à des symbioses impliquant ces flux et stockées dans les tables *substitutions*, *input mutualisations* et *output mutualisations*. Les raisons sont liées à la détection en temps réel des correspondances. Cette problématique est abordée dans la Section 3.3.5.

3.3.1.4 *Contraintes techniques pour la caractérisation des attributs*

La méthodologie d'audit d'entreprises développée dans la Section 2.3 ne permet pas toujours de collecter des données techniques précises et exhaustives sur les flux de matière et d'énergie. De la même manière les données issues de la littérature sont souvent incomplètes. Certaines contraintes souhaitables au niveau informatique ne sont ainsi pas compatibles avec la variabilité des données collectées sur le terrain. Premièrement, de nombreux attributs devraient de prime abord contenir des valeurs numériques. Cependant, la vaste majorité des champs de la base de données sont au format texte pour accommoder des réponses comme « beaucoup » ou « entre 8 et 9 ». Deuxièmement, un flux de même nom peut apparaître plusieurs fois dans le même bilan, par exemple avec des caractéristiques techniques et de qualité différentes, liées à son utilisation dans plusieurs procédés. Pour cette raison, un identifiant unique est donc associé à chaque flux et composant lors de son insertion dans la base (identifiant *id* des entités *flows* et *components*).

Chaque composant est lié à un flux. Chaque flux référence soit un code NOGA, soit une entreprise en fonction du type de donnée considéré. Ces liens sont effectués à l'aide des attributs *ref_id* et *mioa_type*.

3.3.2 Détection de symbioses industrielles (F 3 - F 4)

Cette section traite du développement des fonctionnalités F 3 et F 4 énoncées dans le Tableau 13. Leur objectif est d'exploiter les données contenues dans la base afin d'identifier des symbioses industrielles. Leur détection se base sur la comparaison des chaînes de caractères contenues dans les champs *flow* (table *flows*) et *name* (table *components*). Les correspondances (symbioses industrielles potentielles) se présentent sous forme de correspondances, également appelées appariements.

3.3.2.1 Définitions des niveaux de correspondances

La nomenclature des flux de matière et d'énergie définie dans la Section 2.3.1 possède trois niveaux de description pour un flux (famille de flux, flux, composant). Cette situation implique de définir comment ceux-ci peuvent être appariés, et ce indépendamment des conditions utilisées pour déterminer si une synergie est réalisable. Les premières réflexions ont mis en évidence la nécessité de considérer les correspondances flux-flux, composant-composant, flux-composant et composant-flux, afin d'effectuer une détection exhaustive des potentiels. Un exemple simple permet d'explicitier cette conclusion : un flux sortant de la famille *Objets fonctionnels* de type *fût* ayant un composant *acier*, doit pouvoir être apparié avec un flux entrant *acier* de la famille *Métal*.

Or, une règle énoncée à la Section 0 traitant de l'importation des données stipule que chaque flux doit être doté d'au moins un composant, dont le nom peut être celui du flux lui-même. Dans l'exemple ci-dessus, le composant *acier* du flux *fût* peut donc être apparié au composant *acier* du flux *acier*. Cette solution d'appariement permet, premièrement, de réduire le nombre de comparaisons à effectuer de quatre à deux ce qui diminue le temps de calcul. Deuxièmement, il diminue le nombre de redondances dans les correspondances détectées. Les correspondances recherchées sont donc celles présentées dans le Tableau 14. La Figure 45 et la Figure 46 illustrent en détail les différents appariements possibles.

Tableau 14 : Appariement des flux en fonction des différents niveaux de description. Source : auteur et Basile Schaeli.

		Flux d'entrée		
		Famille de flux	Flux	Composant
Flux de sortie	Famille de flux	non	non	non
	Flux	non	oui	non
	Composant	non	non	oui

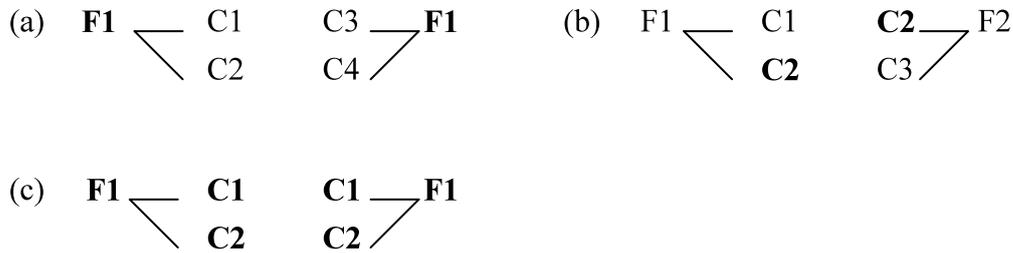


Figure 45 : Correspondances possible pour des substitutions. Source : auteur et Basile Schaeli.

La Figure 45 s'explique de la manière suivante : (a) les composants ne correspondent pas, alors que les flux oui; (b) le composant C2 est présent en entrée et en sortie, donc une synergie possible existe malgré que les flux soient différents; (c) les synergies existent autant au niveau des flux que de celui des composants

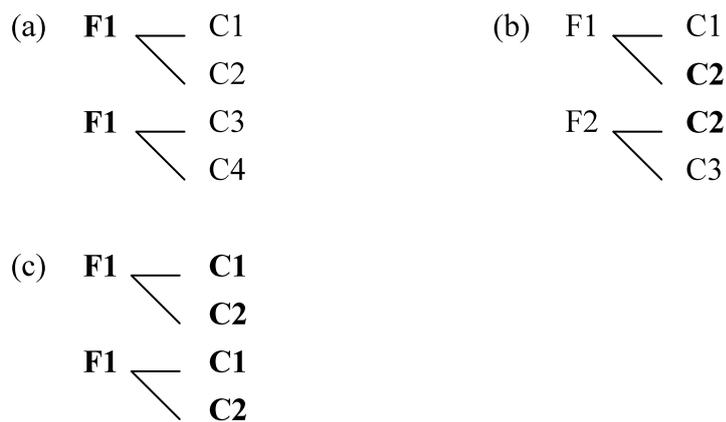


Figure 46 : Correspondances possibles pour des mutualisations de sorties. Source : auteur et Basile Schaeli.

A nouveau, la Figure 46 s'explique de la manière suivante : (a) les composants ne correspondent pas, alors que les flux oui; (b) le composant C2 est présent à deux reprises en sortie, donc une synergie possible existe malgré que les flux soient différents; (c) les synergies existent autant au niveau des flux que de celui des composants

3.3.2.2 *Entreprises et nomenclature des activités économiques*

Les choix conceptuels de la Section 3.2.2 soulignaient l'importance de pouvoir généraliser une recherche de correspondances en travaillant par secteur d'activité, en utilisant la classification NOGA. Ainsi, les correspondances détectées peuvent être de trois types : les symbioses industrielles de type entreprise -

entreprise (C-C), entreprise - code NOGA (C-N) et code NOGA – code NOGA (N-N). Les symbioses (C-C), impliquant des entreprises uniques, incluent les informations de localisation permettant d'afficher la distance entre les deux entités. Les informations concernant des synergies impliquant des codes NOGA (C-N et N-N) diffèrent légèrement dans la mesure où, concernant plusieurs entreprises, elles ne donnent aucun renseignement sur la distance entre les entités. Cette solution permet de réduire le nombre de correspondances en évitant de répéter la même correspondance pour chaque entreprise considérée. A ce stade, il semble plus pertinent de faire un premier tri des correspondances en se basant sur l'analyse des flux impliqués et leurs composants avant de demander la liste complète des appariements possibles entre toutes les entreprises des secteurs d'activité concernés.

Tous les types de requêtes énoncés n'ont pas pu être implémentés. Seules les synergies de substitution peuvent actuellement faire l'objet de recherches en fonction des codes NOGA (Tableau 15).

Tableau 15 : Etat de développement pour les six types de synergies détectées. Source : auteur et Basile Schaeli.

	Substitutions	Mutualisations d'entrées	Mutualisations de sorties
C-C	Oui	Oui	Oui
C-N	Oui	Pas implémenté	Pas implémenté
N-N	Oui	Pas implémenté	Pas implémenté

Les trois tables contenant les substitutions et les mutualisations d'entrées et de sorties sont affichées sur des pages distinctes de l'interface web. Leur architecture sous-jacente est néanmoins identique. Chaque page contient une carte et propose deux champs de recherche : le premier pour les entreprises individuelles (C) et le deuxième pour les codes NOGA (N). L'utilisateur peut alors sélectionner et afficher autant d'entreprises et de codes NOGA qu'il le désire. Ensuite, il a la possibilité d'afficher ou non les synergies détectées pour chaque entreprise ou code. Les correspondances sont classées par famille de flux, sous forme d'onglets. L'affichage peut également être restreint aux synergies n'impliquant que les flux sortants ou entrants, ou en fonction des valeurs contenues dans le champ *rating*. Les correspondances sélectionnées sont affichées sur l'interface cartographique ainsi que sous forme d'un tableau détaillant les attributs de la synergie. La Figure 47 présente les différentes options qui permettent le tri des résultats par entreprise, code NOGA et famille de flux. Cette figure montre les synergies possibles entre quatre entreprises avec les attributs de la première correspondance de la famille métaux.

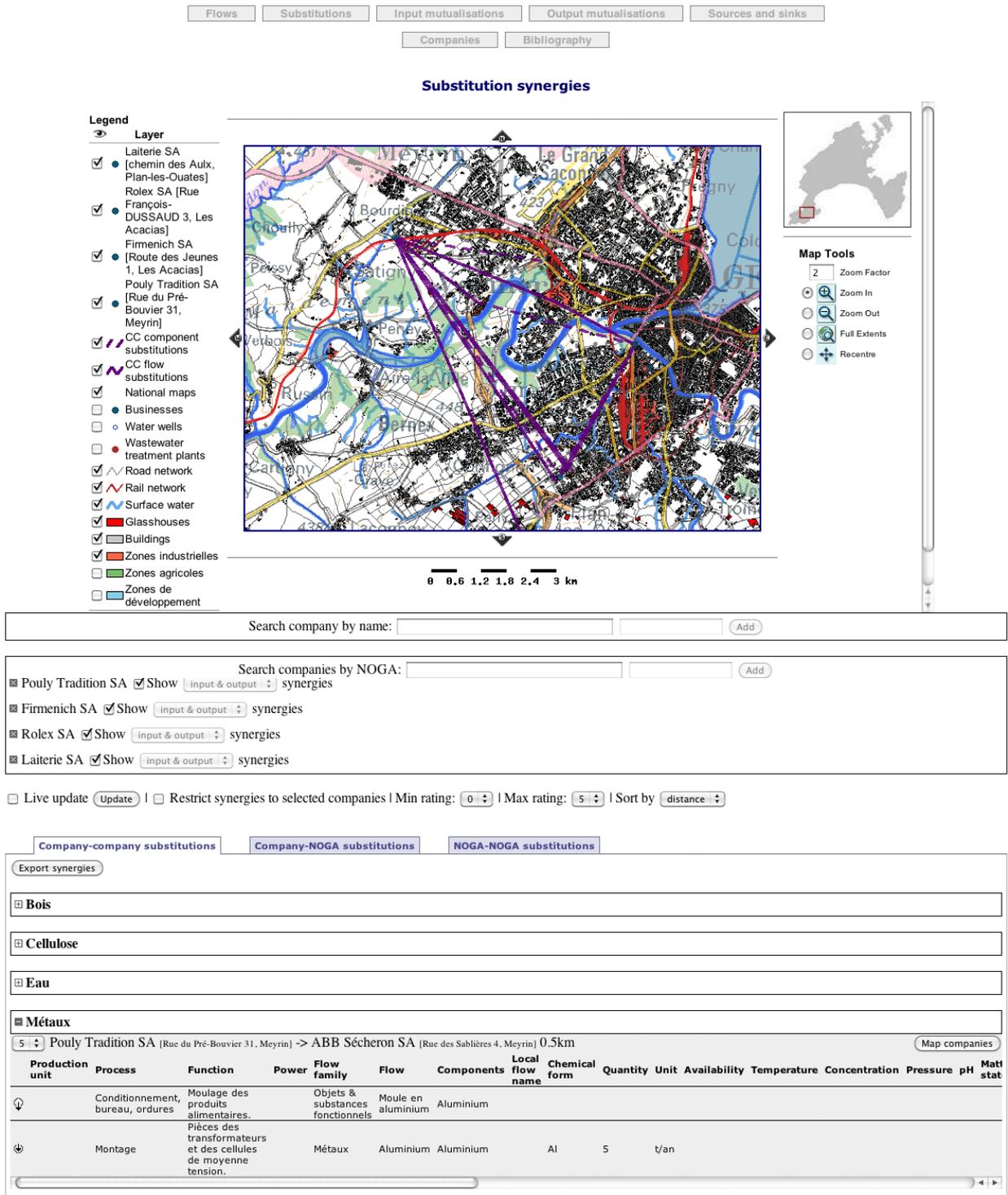


Figure 47 : SymbioGIS – Interface de visualisation de la table *substitutions*. Source : auteur.

3.3.2.3 Application au cas de Genève

L'objectif de cette section est de vérifier le fonctionnement de l'interface et d'évaluer la pertinence de la base de données et des fonctionnalités développées pour la détection de correspondances. Dans ce but, les résultats affichés dans la table *substitutions* suite à l'introduction de données ont été comparés à ceux obtenus à Genève en 2007 avec la méthode Adoue (Carles 2009). La détection de symbioses potentielles a été effectuée entre 2006 et 2008 en utilisant les logiciels ISIS puis Presteo. L'expertise de Cyril Adoue et le travail de terrain que nous avons réalisé lorsque le réseau s'est étendu a permis d'aboutir à une liste réduite de symbioses industrielles pertinentes (Massard 2008).

Les bilans entrants/sortants de douze entreprises établies à Genève ont été importés dans SymbioGIS en utilisant les fichiers Excel résultant des audits des chaînes de production. Les secteurs d'activité concernés sont présentés dans le Tableau 16. La nomenclature originale a été conservée pour les niveaux flux et composants afin de permettre la comparaison avec les résultats de 2008.

Tableau 16: Secteurs d'activité des entreprises considérées lors du test de SymbioGIS. Source : auteur.

Secteur d'activité	Nombre d'entreprises
Agroalimentaire	2
Construction	3
Fabrication de matériel électrique et électronique	3
Horlogerie	1
Industrie chimique	2
Traitement des eaux	1

L'identification de correspondances basées sur la comparaison des noms de flux et de composants est un processus automatique qui fournit des résultats « bruts » sans autre forme d'analyse. Malgré la diminution des appariements possibles grâce à l'établissement des règles établies précédemment, un nombre important de faux positifs est attendu. Une procédure de test des correspondances en trois étapes est proposée afin de trier les résultats obtenus. Celle-ci recourt à l'attribut *rating* des tables de correspondance décrit à la Section 3.3.5 et qui permet de filtrer manuellement les correspondances obtenues et d'identifier les faux positifs.

Etape 1 : Identification des champs *flux* et *composants* afin d'éliminer les correspondances redondantes entre les niveaux composant-composant et flux-flux. Pour les cas identifiés, le chiffre zéro est indiqué dans le champ *rating* de l'appariement ;

- Etape 2 : Identification des correspondances physiquement impossibles. A titre d'exemple, un rejet d'eau industrielle contenant du ciment associé à une entrée de ciment, une sortie de verre liée à une entrée d'époxyde chargé en verre, une sortie de matière plastique liée à une entrée de gants composé de plastique, des chutes de métaux liée à une entrée de vis ou une sortie d'un mélange de papier carton associée à une entrée de papier ne constituent pas des opportunités réalistes. Leur *rating* est évalué à zéro également ;
- Etape 3 : Analyse et rating des pistes restantes en détaillant les principaux paramètres traitant de la faisabilité technique. Les champs *forme* et *qualité* permettent d'exclure un grand nombre de correspondances manifestement incompatibles. Dans certains cas, la forme est directement indiquée dans le nom du flux, ce qui implique de considérer les deux champs simultanément (p. ex. objets fonctionnels comme les palettes en bois et les gants en matière plastique). Les incompatibilités de forme et de qualité se manifestent de la manière suivante : des sorties de palettes en bois avec des entrées de caisses en bois ou des sorties de plaques de cuivre avec des entrées de fil de cuivre. Lorsque le flux sortant est, par exemple, qualifié de souillé ou de très souillé, une attention particulière est portée aux champs du flux entrant (fonction, commentaire) afin de déterminer si la piste doit être abandonnée. Le champ *fonction* est également un bon indicateur de la faisabilité ou non d'une synergie. A titre d'exemple, une entrée d'eau potable servant à la fabrication du pain ne permet pas de réutiliser une eau potable de refroidissement. Finalement, les autres champs, renseignant notamment sur le potentiel de substitution, comme les commentaires et la quantité, peuvent également être parcourus afin d'éliminer les correspondances techniquement non réalisables. L'évaluation inscrite dans le champ *rating* est finalement définie par l'expert en fonction de la finesse du classement qu'il souhaite obtenir.

Après l'importation des douze bilans, la table *substitutions* affiche plus d'un millier de correspondances en comptant l'ensemble des synergies composant-composant et flux-flux. Les trois étapes de tri ont permis de réduire le nombre de correspondances intéressantes à trente et une, permettant une comparaison des résultats avec ceux de 2008 (Tableau 17).

Les correspondances pertinentes concernent douze des dix-huit familles de flux. Les familles macromolécules, matières organiques, organismes vivants, textiles et cuirs ne sont pas représentées dans la liste réduite des pistes. Les secteurs d'activité considérés expliquent cette situation : les douze entreprises utilisent pas ou très peu ces types de substances. Aucune synergie n'a non plus été conservée pour les familles boues et matériaux électroniques et informatiques. Les boues ont révélé une correspondance ne constituant pas une synergie à proprement parler. Le résultat est néanmoins pertinent car il prouve l'efficacité de la comparaison des chaînes de caractères. Dans le cas des matériaux

informatiques, les synergies détectées consistaient par exemple en l'utilisation d'abrasif en verre pour un support de circuit imprimé ou de matériel informatique pour des composants électroniques entrant dans la fabrication de capteurs. Ces utilisations sont physiquement impossibles.

La famille des huiles et graisses apparaît comme un bon exemple pour évaluer la procédure d'analyse des correspondances. Les seules synergies retenues peuvent être considérées comme ayant peu de chance d'être réalisables techniquement : soit les vieilles huiles sont souillées et leur incinération doit se faire dans des installations spécifiques, soit l'huile d'entrée doit posséder des caractéristiques particulières (conductivité électrique et thermique faibles, par exemple). Les huiles ont donc passé avec succès les deux premières étapes de tri selon les trois étapes présentées précédemment, mais la faisabilité de l'échange se heurte maintenant aux paramètres techniques, légaux, économiques et environnementaux dont l'évaluation requiert des connaissances approfondies.

Le Tableau 17 indique le taux de synergies détecté par SymbioGIS par rapport aux travaux de terrain réalisés à Genève entre 2005 et 2008 avec le logiciel Presteo (Adoue 2005; Massard 2008). Les résultats montrent que seulement 32 % des synergies contenues dans la liste des pistes pertinentes à Genève ont été détectées telles quelles. Le Tableau 39 de l'Annexe 3 fournit une analyse détaillée sur le tri des occurrences par famille de flux et explicite en détail les résultats.

Au vu des résultats énoncés, l'explication des différences doit être premièrement recherchée dans la structure de la nomenclature et dans l'exhaustivité des bilans de flux utilisés comme source de données. Les connaissances de l'expert, élément primordial des études précédentes, doivent également être prises en compte. Son intervention se fait donc à plusieurs niveaux, comme expliqué dans les procédures de terrain détaillées dans les Sections 2.5.1 et 2.5.2.

37% des correspondances non détectées ont révélé un problème lié à l'exhaustivité des bilans de flux importés. Selon notre expérience, un expert possédant des connaissances approfondies des activités considérées détecte souvent plus d'opportunités que la seule comparaison des chaînes de caractère. Les bilans importés sont issus des audits d'entreprise. Ils ne sont pas toujours exhaustifs. Ainsi, l'absence d'un ou de plusieurs flux concernés limite les possibilités de détection. L'expert peut ajouter ces données de manière déductive ou comme dans le cas présent en tenir compte uniquement lors de son analyse des pistes.

Les 63% de correspondances non détectées restant sont dus à des problèmes liés à la nomenclature utilisée (37%) et aux multiples possibilités de substitution de fonction entre des flux ne portant pas le même nom (26%). La prise en compte de ces deux éléments pour les futurs développements permettrait de diminuer le nombre de faux positifs.

En conclusion, malgré le faible taux de correspondances détectées, le test technique sur le fonctionnement de la table *substitutions* de SymbioGIS s'est révélé satisfaisant. La base de données a détecté plus de correspondances potentiellement intéressantes que Presteo ne l'avait fait, mais la plupart sont différentes. Le faible taux de détection de correspondances similaires est lié d'une part à la nomenclature et d'autre part aux connaissances de l'expert, et non à la base de données elle-même.

L'intégration de données en provenance du projet pilote de Genève permet cependant d'énoncer un certain nombre d'enseignements techniques. Ils sont détaillés à la Section 3.4. L'analyse des résultats du test recourent les conclusions énoncées par Adoue dans ses travaux de recherches (Adoue 2004).

Tableau 17 : Comparaison de la détection de correspondances entre SymbioGIS, en 2010, et Presteo, utilisé dans l'étude de cas de Genève entre 2005 et 2008, pour un échantillon de 12 entreprises. Source : auteur.

Efficacité de la détection	Nombre d'occurrences	Taux de détection
Détection de correspondances avec SymbioGIS	31	100 %
Détection de correspondances avec Presteo	25	81 %
Nouvelles correspondances détectées par SymbioGIS	6	19 %
Correspondances similaires entre SymbioGIS et Presteo	10	32 %
Correspondances de Presteo non détectées par SymbioGIS	15	48 %
Correspondances de Presteo partiellement détectées par SymbioGIS	4	13 %
Détail des catégories non détectées ou partiellement détectées par SymbioGIS		
Absence du nom de flux	7	37 %
Substitution de matériau	5	26 %
Problème de nomenclature	7	37 %

3.3.3 Visualisation des correspondances sur l'interface cartographique (F 6 - F 10)

Cette section détaille les fonctionnalités F 6 et F 10 du Tableau 13, soit la visualisation des synergies potentielles et existantes sur une interface cartographique. Les informations contenues dans les trois tables *substitutions*, *input mutualisations* et *output mutualisations* sont accessibles sur des pages distinctes de l'interface web (Figure 47). Une fois les éléments désirés sélectionnés par l'utilisateur, les correspondances sont affichées sous forme d'un tableau détaillant les attributs de la synergie ainsi que sur l'interface cartographique. A chaque information est attaché un bouton « Map companies » permettant de produire une carte composée d'un fond de carte (carte nationale) et des couches thématiques détaillées à la Section 3.2.4, sur lesquels sont affichées les informations relatives à l'ensemble de

correspondances sélectionnées. Lors d'une modification de la sélection, une requête est envoyée au serveur demandant le rafraîchissement de la carte et des tableaux détaillant des synergies³⁵.

L'interface cartographique se compose des éléments suivants : à gauche de la carte sont listés les fonds de cartes et les couches thématiques disponibles. L'utilisateur peut choisir celles qu'il désire afficher en les sélectionnant, puis en rafraîchissant la carte à l'aide du bouton « Redraw Map ». La colonne de droite propose des outils de navigation dans l'interface cartographique : zoom, centrage de la carte, ainsi qu'un outil « Query » permettant d'effectuer des requêtes sur les éléments affichés (Figure 48).

3.3.3.1 Application au cas de Genève

Lorsque toutes les entreprises sont sélectionnées, les pistes de synergies détectées dans le cadre du projet pilote de Genève peuvent être affichées sur l'interface cartographique. Les couches thématiques affichées ici sont les entreprises, les zones industrielles, agricoles et de développement, les serres agricoles, les installations de traitement des eaux, les bâtiments, ainsi que le réseau routier. Les correspondances sont affichées sous forme de lignes pointillées. Le cheminement, de même que la distance affichée dans les tables contenant les appariements représente la distance euclidienne et ne suivent pas les réseaux routier ou ferroviaire (Figure 48).

³⁵ La génération des cartes permettant la visualisation des synergies détectées utilise le MapServer. Celui-ci génère une carte à partir d'un *mapfile* qui décrit les différentes couches à afficher. Pour chaque couche, ce fichier spécifie la forme de l'affichage (couleur, transparence, etc.), ainsi que la source des données. Le *mapfile* est généré dynamiquement par le code PHP en fonction des paramètres spécifiés par l'utilisateur. Cette solution, parfois plus lente, a l'avantage de permettre la génération de cartes contenant un nombre arbitraire d'éléments. L'implémentation actuelle impose néanmoins une contrainte : toutes les cartes sont générées dans un fichier du même nom. Elle n'est donc pas robuste en cas de développement du mode multi-utilisateur qui permettrait de générer simultanément plusieurs cartes.

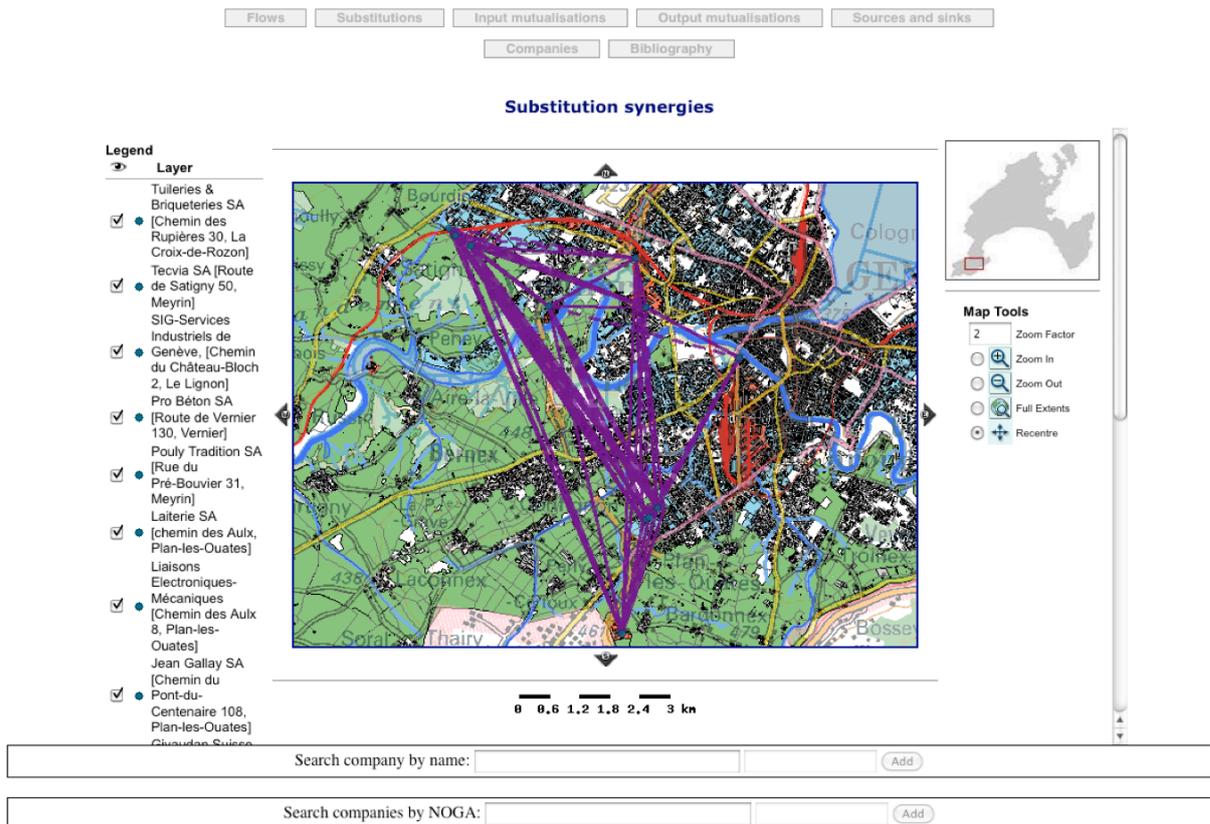


Figure 48 : SymbioGIS – Interface de visualisation des synergies de substitution intégrant les champs de recherche par entreprise et par code NOGA. Les appariements affichés correspondent aux 1000 résultats obtenus pour 12 entreprises du projet pilote de Genève. Source : auteur.

3.3.4 Gestion des entreprises, identification des puits et sources et création de zones tampons (F 6 - F 7 - F 10)

A côté de la détection et de la visualisation des correspondances de substitution et de mutualisation à proprement parler, plusieurs autres fonctionnalités ont été identifiées en se basant sur les développements déjà réalisés. Celles qui sont présentées ici reprennent les objectifs des fonctionnalités F 6, F 7 et F 10 du Tableau 13. Leur objectif est d'accroître les possibilités d'analyse de l'interface et son utilité pour la planification territoriale.

Premièrement, il est possible de détecter et de visualiser sur l'interface cartographique toutes les entreprises appartenant à un ou plusieurs codes NOGA. Lorsque les champs désirés sont renseignés, l'outil « Query » permet d'accéder aux informations contenues dans les tables *entreprises* et *contacts* afin d'obtenir des informations sur les activités, le nombre d'employés et les contacts existants pour ces entreprises. Cette fonctionnalité permet de détecter visuellement des clusters d'activités et d'étudier la proximité entre certains secteurs économiques complémentaires.

Deuxièmement, le positionnement et la visualisation de tous les puits et sources d'une famille de flux, d'un flux ou d'un composant sont possibles selon le même principe. Cette fonctionnalité permet de localiser toutes les entreprises consommant ou générant une famille de flux, un flux ou un composant, et de créer des zones tampons sous la forme de buffers de distance (il s'agit de zones tampons autour d'un élément du territoire dont le rayon peut être introduit par l'utilisateur, par exemple 100 mètres). Leur affichage sur l'interface cartographique ouvre de nombreuses perspectives pour la détection de correspondances potentielles directement à l'écran et pour l'aide à la décision dans la planification territoriale. En facilitant la reconnaissance et en renseignant sur la distance, ils aident à l'identification de clusters de ressources, soit un groupe d'entreprises situées dans un espace géographique restreint, par exemple une zone industrielle, utilisant ou rejetant un même flux. Ils permettent également d'effectuer une détection visuelle de synergies entre des entreprises et certains éléments contenus dans les couches thématiques affichées mais pour lesquels la BD ne possède pas encore de données. Cette fonctionnalité permet d'étudier la proximité entre différents éléments du territoire, tout en disposant d'informations sur les flux de matière émis ou nécessaires aux entreprises. Pour obtenir plus de données plus précises, l'utilisateur peut alors faire appel à l'outil de requête « Query » pour cliquer sur l'un des buffers et visualiser les informations disponibles sur l'entreprise concernée. L'analyse visuelle des éléments contenus dans les couches thématiques permet de dresser une liste des activités économiques et des infrastructures (bâtiment, serres agricoles) à auditer en priorité.

Finalement, le Tableau 13 indique que la fonctionnalité F 7 n'a été que partiellement développée. Effectivement, aucun script permettant d'identifier un emplacement minimisant ou maximisant une ou plusieurs contraintes n'a été implémenté à l'heure actuelle. Cependant, les fonctionnalités décrites précédemment ont révélé un potentiel pour réaliser dans certains cas cette analyse visuellement en

affichant les couches thématiques appropriées. L'utilisateur peut en effet afficher les couches contenant les zones de développement et l'occupation du sol afin de déterminer les parcelles les plus appropriées pour l'installation d'une nouvelle activité économique en fonction des puits et des sources de ressources avoisinants. Il peut ainsi afficher les puits et sources de certains flux susceptibles d'être utilisés par la future activité afin d'identifier visuellement le point minimisant les distances à parcourir, augmentant ainsi la probabilité de réalisation de la collaboration. Pour parfaire cette fonctionnalité, des paramètres concernant la proximité des infrastructures de transports (graphes routier et ferroviaires) et liées au foncier devront être considérés dans le modèle. Ces réflexions sont reprises dans la discussion de la Section 3.5.

3.3.4.1 *Application au cas de Genève*

Chacune des trois fonctionnalités énoncées précédemment a été testée dans le cas de Genève. La première, concernant la localisation des activités économiques par secteur est illustrée par une application concernant la gestion des déchets. L'objectif de celle-ci est d'optimiser la collecte et la valorisation d'un co-produit en identifiant les installations habilitées les plus proches. Pour ce faire, la proximité entre les sources d'un co-produit issu de certaines activités et les infrastructures de collecte, valorisation et recyclage des déchets (code NOGA 36) disposant d'une autorisation de traitement adaptée est étudiée. En affichant une ou plusieurs entreprises d'un secteur simultanément au code NOGA 36, l'infrastructure la plus proche peut être identifiée. L'habilitation à reprendre un déchet est analysée grâce à l'outil « Query ». Les données disponibles proviennent des informations rendues publiques sur le site internet du Service cantonal de géologie et de gestion des déchets (GESDEC). Cette fonctionnalité ouvre des perspectives pour renseigner les décideurs du secteur privé sur les installations et, lorsqu'un audit a été effectué, sur leur performance. Elle fournit ainsi des arguments relatifs à la performance environnementale pouvant influencer le choix du repreneur. Cette possibilité offre un potentiel pour optimiser les transports sur le territoire considéré. La Figure 49 illustre cette fonctionnalité en mettant en évidence les collecteurs de déchets autorisés pour les rejets d'huiles de lubrification.

La deuxième application concerne l'étude de la proximité entre une entreprise auditée et d'autres infrastructures du territoire. L'exemple développé ici concerne la valorisation de rejets thermiques. En particulier, les bâtiments et les serres agricoles peuvent être considérés comme des puits de chaleur. Cependant, ces infrastructures n'étant pas disponibles dans la table *entreprises* ou ne possédant pas de bilan de flux, la recherche classique de correspondance par comparaison des chaînes de caractère ne donne aucun résultat. L'affichage simultané sur l'interface cartographique des sources de rejets thermiques et des couches thématiques relatives à l'occupation du sol, aux bâtiments et aux serres agricoles met en lumière de nouvelles opportunités de valorisation des rejets. La Figure 50 illustre cette fonctionnalité pour la zone industrielle de Plan-les-Ouates (ZIPL) à Genève. Les sources de chaleur résiduelle sont représentés avec des buffers de 500 mètres, permettant d'identifier les infrastructures pertinentes minimisant la distance et ainsi les coûts liés au transfert du flux. L'utilisateur, soit le

coordinateur ou toute personne ayant accès à l'outil peut ainsi recommander un audit des infrastructures mises en évidence.

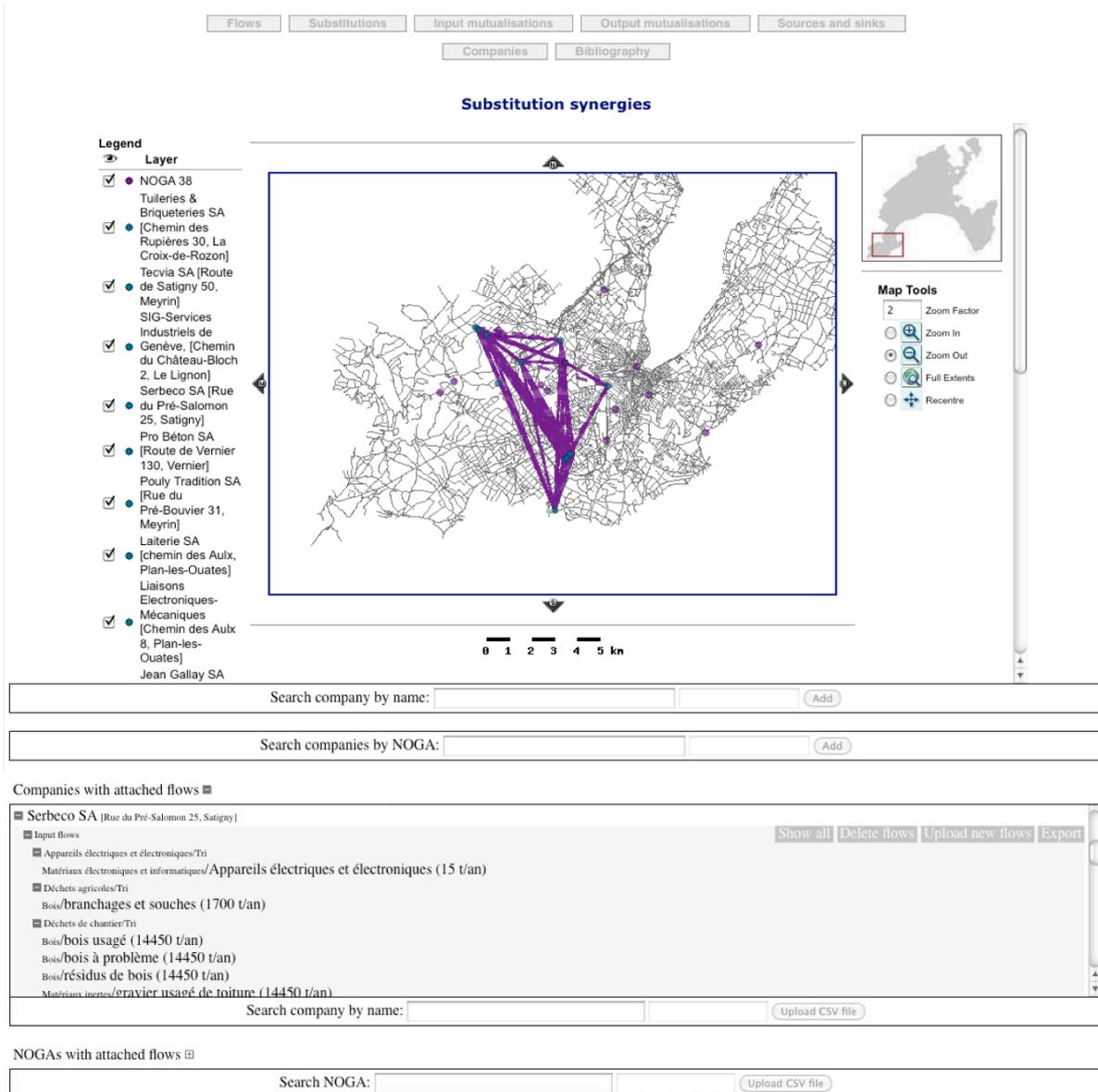


Figure 49 : SymbioGIS – détection des entités économiques de collecte, valorisation et recyclage des déchets. Source : auteur.

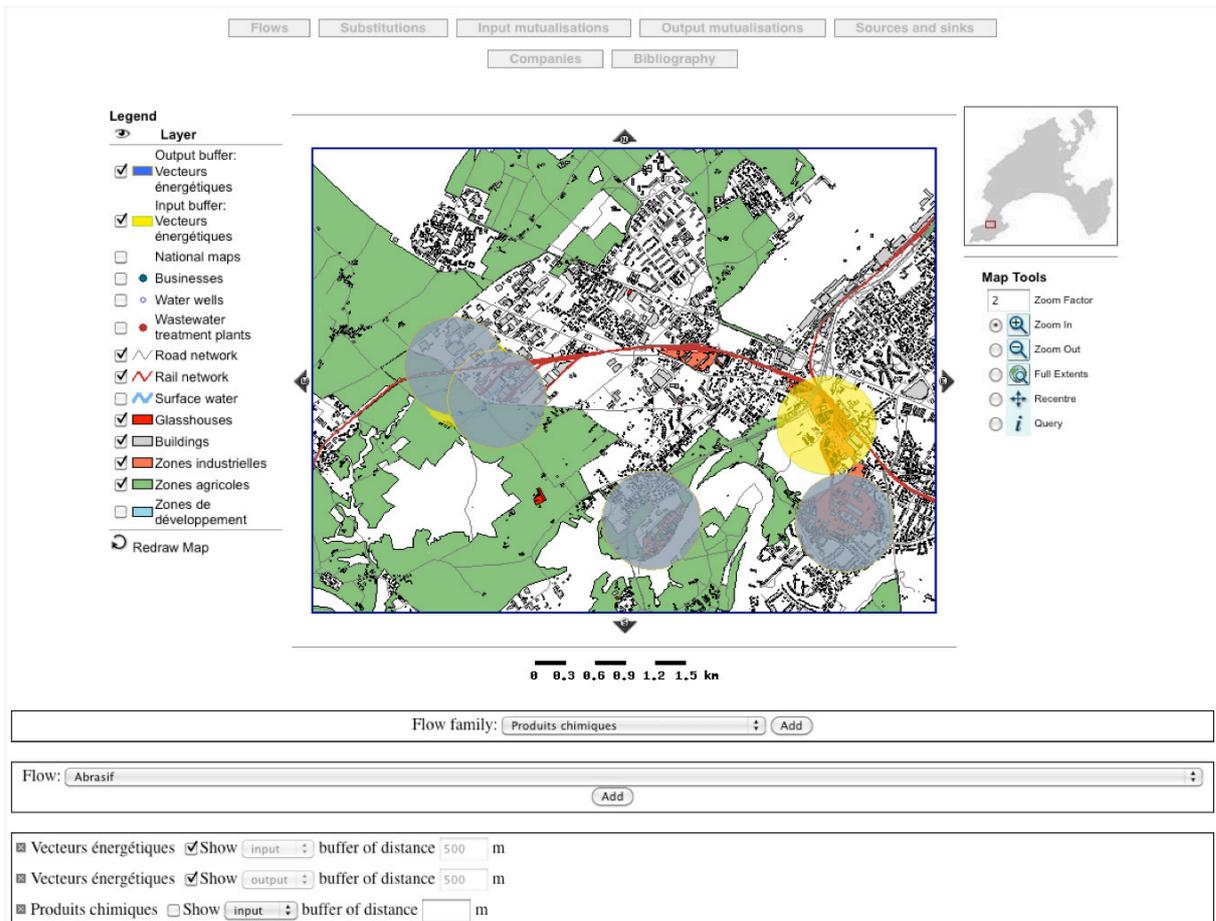


Figure 50 : SymbioGIS – visualisation simultanée des puits et des sources de chaleur de 12 entreprises du canton de Genève et des couches occupation du sol, bâtiments et serres agricoles. Source : auteur.

Un autre exemple révèle tout le potentiel de cette fonctionnalité. De la même manière que les sources de chaleur, les entreprises consommant de grandes quantités d'eau et donc représentant des puits importants peuvent être affichées par l'intermédiaire de buffers. Parallèlement, la couche thématique *Eaux souterraines et de surface* renseigne sur la présence d'aquifères et de cours d'eau exploitables par certaines activités économiques ne nécessitant pas des flux entrants de qualité potable, comme les secteurs de la construction ou du traitement des déchets. En effet, lorsque les contraintes de qualité le permettent, l'eau potable peut être substituée par la ressource endogène d'eau issue des nappes souterraines et superficielles, ainsi que des eaux de surface. Cet exemple est basé sur une étude réalisée dans le cadre des travaux du groupe de travail Ecosite (Carvalho et Massard 2010). La Figure 51 illustre cette situation pour la zone industrielle de Meyrin Satigny (ZIMEYSA) regroupant plusieurs activités des secteurs de la construction et de la gestion des déchets. L'affichage de la couche thématique détaillant la

ressource située à proximité permet d'affirmer qu'il existe un potentiel important de substitution de puits d'eau potable par de l'eau souterraine non potable.

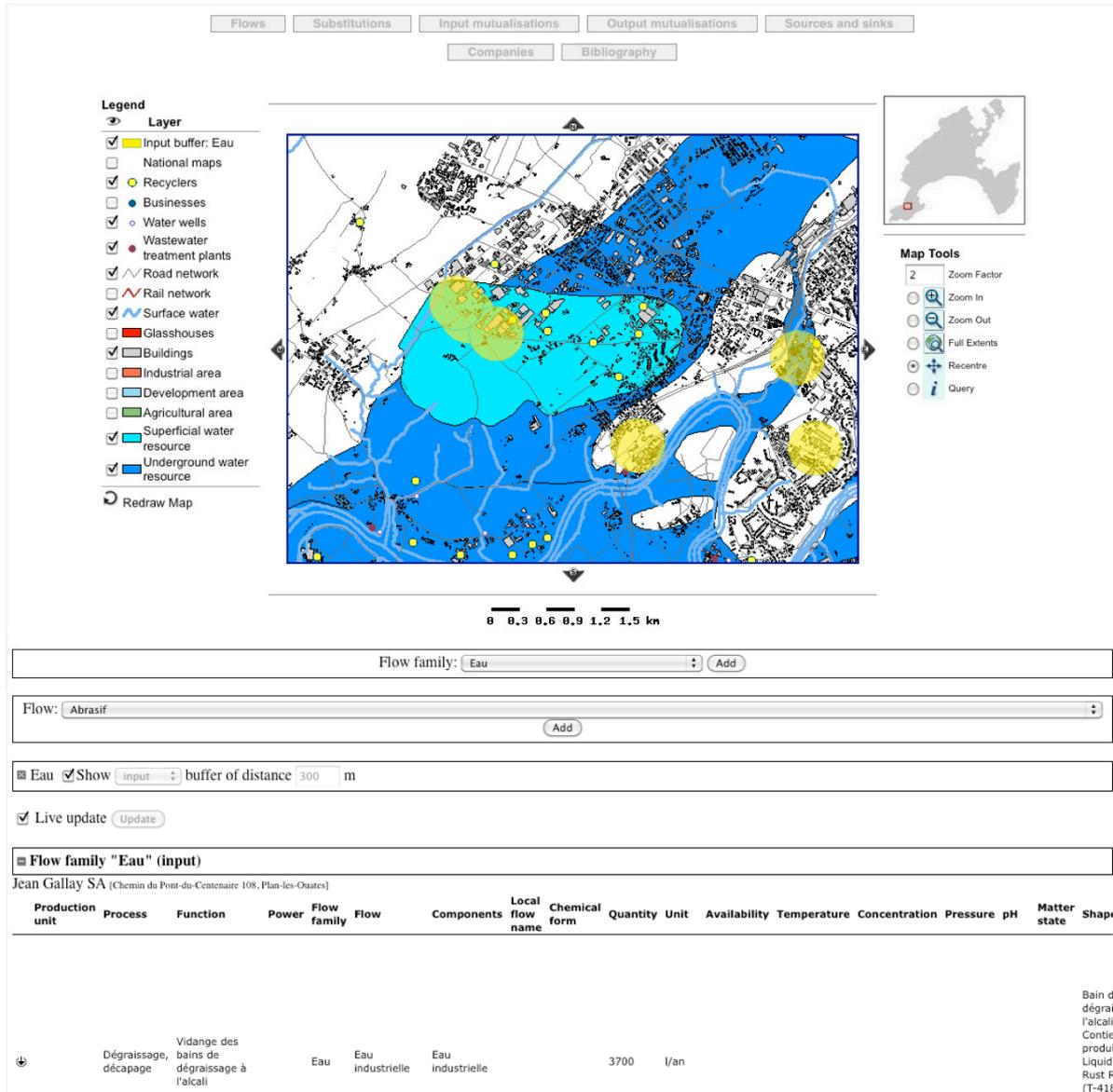


Figure 51 : SymbioGIS – visualisation simultanée des puits d'eau potable de 12 entreprises du canton de Genève et des couches représentant les ressources d'eau souterraines et superficielles, ainsi que les eaux de surfaces exploitables. Source : auteur.

Un troisième potentiel d'analyse visuelle a été testé dans le cas de Genève. Bien qu'aucun script ne permette pour l'instant d'identifier un emplacement minimisant ou maximisant une ou plusieurs contraintes, l'affichage de certaines couches thématiques facilite la réalisation visuelle de cette analyse.

Cet exemple révèle le potentiel de développement d'un script intégrant un modèle mathématique d'analyse permettant d'identifier un emplacement ou une parcelle minimisant certaines contraintes.

Les couches thématiques contenant les zones de développement et l'occupation du sol permettent d'identifier un certain nombre de parcelles qui semblent de prime abord appropriées pour l'installation d'une nouvelle activité économique. L'analyse de pertinence peut être enrichie en affichant également les graphes ferroviaire et routier pour prendre en compte la proximité aux infrastructures de transport. La prise en compte des puits et sources de matières et d'énergie à ce stade introduit un nouveau paramètre pour le choix des activités à installer en priorité sur ces parcelles. Cette idée serait intéressante dans une perspective de promotion économique ou pour aider un gros consommateur de ressources à identifier le lieu d'implantation le plus intéressant pour lui. A titre d'exemple, la Figure 52 propose la visualisation simultanée des couches thématiques susmentionnées et des puits et sources de produits chimiques de certaines activités économiques situées sur la rive gauche du canton. Cette représentation cartographique permet d'identifier plusieurs sites a priori intéressants pour accueillir une activité du secteur de la chimie ou pouvant potentiellement valoriser certains de leurs flux sortants.

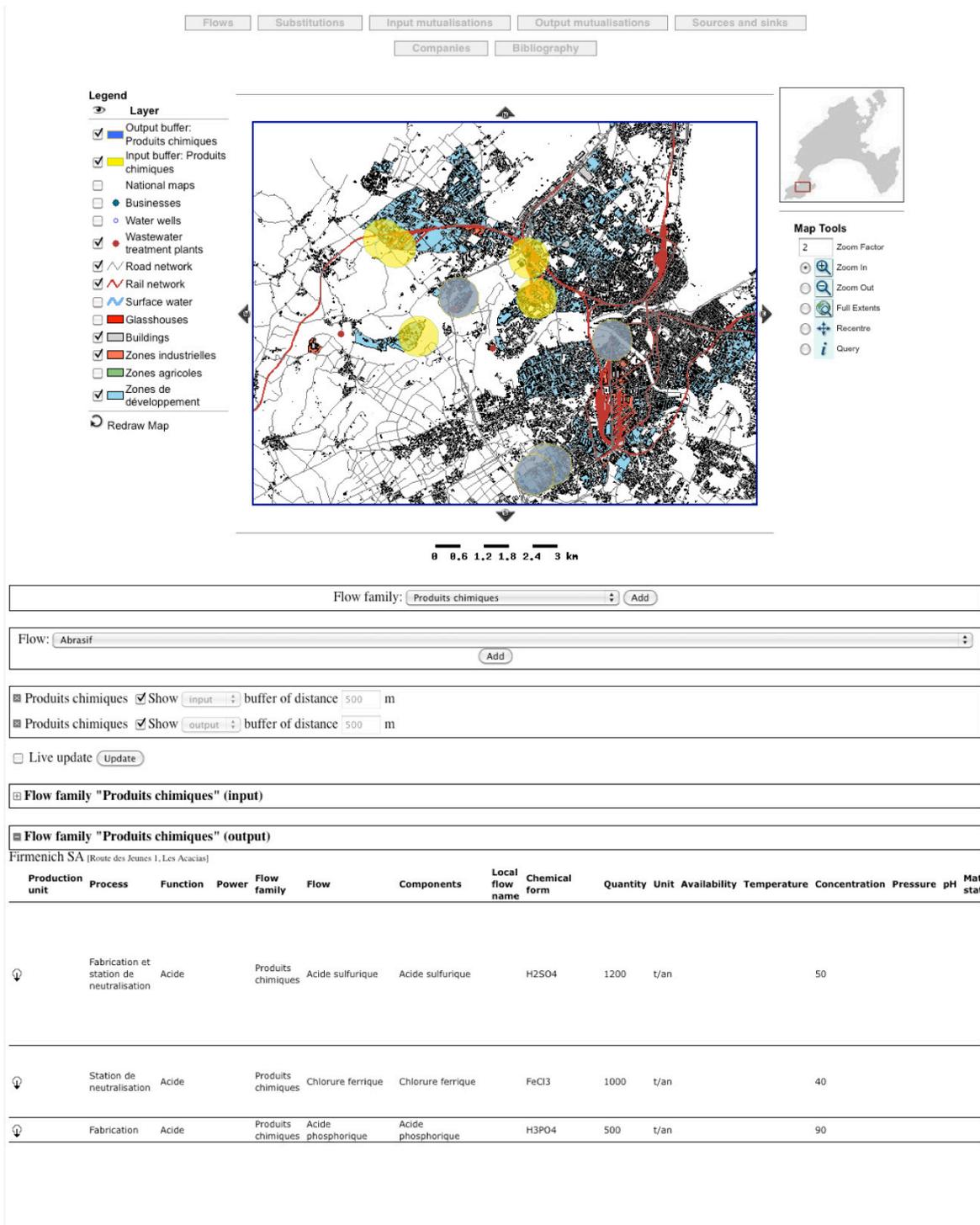


Figure 52 : SymbioGIS – premiers éléments pour l’aide à la décision pour le positionnement de nouvelles activités en fonction d’autres éléments du territoire. Visualisation des puits et sources de produits chimiques en lien avec les zones de développement. Source : auteur.

3.3.5 Éléments pour la gestion de projets (F 9)

La dernière fonctionnalité ayant fait l'objet d'un développement partiel concerne la gestion de l'analyse de faisabilité et le suivi de la mise en œuvre des symbioses détectées (n°9, Tableau 13). Les trois tables contenant les correspondances identifiées contiennent des attributs supplémentaires permettant d'intégrer de nouvelles informations postérieurement à la comparaison des chaînes de caractères, soit lors de l'analyse des pistes ou lors de leur mise en œuvre. Le champ *commentaire*, en format texte, permet par exemple à l'utilisateur d'expliquer la faisabilité, la pertinence ou l'état d'avancement de la réalisation d'une correspondance. De la même manière, l'attribut *rating*, déjà mentionné dans la Section 3.3.2 permet de noter chaque correspondance. L'utilisateur a ainsi la possibilité de modifier le rating des synergies affichées en fonction de leur degré de faisabilité. Un tri peut ensuite être demandé au sein des appariements pour faire apparaître en tête de liste les plus forts potentiels. Cette fonctionnalité s'est révélée extrêmement utile lors du test de la fonction détection pour détailler les raisons du choix d'un appariement et son évaluation.

L'ébauche d'un référentiel d'évaluation des correspondances par famille de flux est proposée dans le Chapitre 4 dans le cadre des réflexions sur la faisabilité et la pertinence. Cette fonctionnalité représente un premier pas vers l'utilisation de SymbioGIS pour soutenir la gestion de projets. Les utilisateurs peuvent enregistrer leur propre évaluation sur le potentiel de réalisation d'une symbiose dans la BD, rendant l'information accessible à l'ensemble des utilisateurs. Le développement de cette fonctionnalité n'est cependant pas abouti.

3.3.5.1 *Application au cas de Genève*

L'utilisation de cette fonctionnalité a été décrite en détail en lien avec le test de détection de symbioses industrielles détaillé dans la section 3.3.2.3. Si elle s'est révélée très utile dans ce cadre, elle n'a pas fait l'objet d'autres applications à ce stade. Les critères pour les analyses de faisabilité et de pertinence dans le contexte suisse (et genevois) sont détaillés par famille de flux dans le Chapitre 4.

3.4 LIMITES TECHNIQUES ACTUELLES ET PISTES D'AMÉLIORATIONS

La version actuelle de SymbioGIS constitue ainsi un prototype du modèle développé à la Figure 41 de la Section 3.2.3.1. A son stade de développement actuel, le programme possède uniquement la base de données sur les flux de matière et d'énergie et l'interface destinée au grand public. Les fonctionnalités F 1 à F 10 décrites dans les sections précédentes en font aujourd'hui déjà un outil utile aux acteurs spécialisés dans la planification territoriale (Figure 53).

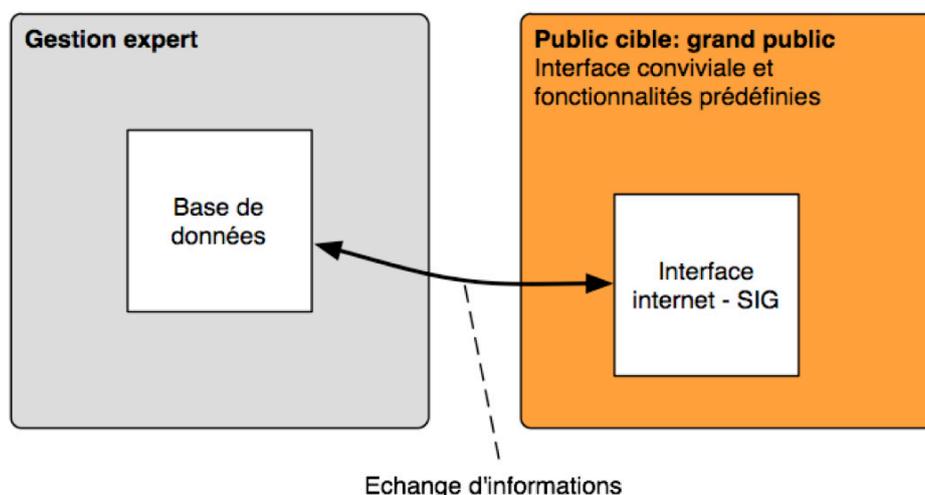


Figure 53 : Architecture du prototype SymbioGIS (selon Figure 41). Source : auteur.

Les choix techniques effectués en se basant sur la revue de littérature ont permis d'éviter certains pièges et de développer rapidement un outil intégrant des fonctionnalités performantes, et pour certaines, prometteuses. Leur application sur des portions du territoire genevois permet de revenir sur ces choix et d'en tirer un certain nombre d'enseignements et de recommandations pour améliorer la performance de l'implémentation actuelle. Les sections suivantes se concentrent sur l'identification de pistes destinées à améliorer techniquement et à enrichir les fonctionnalités décrites précédemment. Il s'agit ici d'éléments techniques précis qui ne seront pas repris dans la discussion.

Ce travail a contribué à mieux cerner les besoins d'un système d'information pour accompagner le développement des symbioses industrielles et à évaluer la pertinence de certaines fonctionnalités. La problématique de la performance technique de l'implémentation, qui se fait souvent au détriment de la lisibilité, de sa flexibilité et de sa stabilité, ne sera pas abordée en détail ici³⁶.

³⁶ L'interface pourrait par exemple être plus rapide si l'affichage des pages utilisait le cache des navigateurs pour stocker de l'information. Certaines requêtes de grande taille, comme les associations NOGA-entreprise et NOGA-NOGA, nécessitent la création de nombreuses jointures (JOIN) entre tables. Celles-ci pourraient être évitées en répliquant certaines informations dans plusieurs tables stockées temporairement dans le cache.

3.4.1.1 *Importation et exportation des données (F 1 et F 2, Section 0)*

La procédure d'importation des données dans la BD n'est pas suffisamment robuste. En cas d'erreur, il est possible que seule une partie des informations soient introduites dans la base de données à partir du fichier Excel. A l'heure actuelle, l'échec de l'insertion d'un flux ou d'un composant n'a pas d'impact sur l'insertion des autres composants du flux, ou sur celle des autres flux du bilan. Si l'utilisateur se rend compte immédiatement de l'erreur, il peut facilement y remédier en important à nouveau son fichier après correction de l'erreur, ce qui entraînera la suppression des informations partielles. Cependant, si celle-ci est remarquée lors d'une manipulation ultérieure, le remplacement du fichier pourrait entraîner la suppression des informations attachées aux appariements comme les attributs *commentaire* et *rating* (Section 3.3.5).

Le problème de la suppression des données existantes lors de l'importation d'un nouveau bilan pourrait être réduit en développant une interface permettant de visualiser et de modifier les flux et les composants. Le design de celle-ci ne serait toutefois pas aisé au vu du nombre important de colonnes pour chaque entrée. Une alternative plus complexe consisterait à vérifier chaque flux et composant au cours de l'importation, et de fournir à l'utilisateur une interface facilitant la gestion manuelle des cas ambigus.

Le passage obligé par le format CSV augmente les possibilités de confusion et d'erreur. L'utilisation d'un format XML comme le format .xlsx permettrait d'importer directement un bilan de flux. Ce changement pose toutefois des contraintes de compatibilité entre les différentes versions d'Excel disponibles (PC, Mac, 2003, 2007, 2008, anglais, français, etc.) ou relatives à l'utilisation d'autres tableurs (OpenOffice).

Afin de faciliter la gestion des données contenues dans les fichiers d'audit et dans la BD, il serait intéressant de créer une interface de gestion des importations et des exportations intégrant des repères temporels comme la date et l'heure de la dernière importation ou exportation. Cela faciliterait non seulement la mise à jour et l'enrichissement des données existantes mais permettrait également à plusieurs utilisateurs de suivre les manipulations effectuées et d'ainsi éviter les incohérences et les conflits. L'utilisation d'un seul format de fichier pour l'importation reste cependant primordiale pour garder la compatibilité et les possibilités de réimportation.

3.4.1.2 *Détection de symbioses industrielles (F 3 et F 4, Section 3.3.2)*

Pour douze entreprises, la table *substitutions* a enregistré plus de mille correspondances. Ce nombre est considérable mais prouve que l'architecture mise en place pour comparer les chaînes de caractère fonctionne. Techniquement, la qualité et l'exhaustivité du script de détection sont donc satisfaisantes. Les choix effectués à la Section 3.3 pour optimiser cette tâche se sont révélés pertinents. La stratégie actuelle génère cependant un trop grand nombre de doublons. Toutes les synergies impliquant deux flux ayant un seul composant portant le même nom que le flux apparaissent une première fois comme appariement flux-flux, et une deuxième fois comme appariement composant-composant. Une solution pour remédier à

ce problème et diminuer leur nombre consiste à ajouter un test, correspondant à un filtre, lors de la recherche de correspondance. Les conditions du test permettraient d'afficher une seule fois la synergie dans le niveau flux si le nombre de composant est égal à 1 et si l'attribut *name* de la table *components* correspond à l'attribut *flow* de la table *flows*. Cette solution a l'avantage de ne pas réduire le nombre de synergies détectées mais d'introduire une condition sur leur affichage. De manière générale, d'autres filtres pourraient être créés pour rendre la détection des correspondances plus robuste et diminuer le nombre de faux positifs.

L'interface de visualisation des synergies flux-flux des trois tables contenant les correspondances inclut la liste des composants associés afin de faciliter l'évaluation de la synergie. Les appariements composant-composant sont par contre affichés de manière isolée, détachée de l'information relative aux autres composants du flux et de leurs caractéristiques techniques. Cette situation, issue des premiers développements de SymbioGIS, complexifie le travail de l'utilisateur, même expert, qui n'a pas accès directement à toutes les informations nécessaires sur la même page. Un affichage systématique des deux flux, ainsi que de chacun de leurs composants, en mettant en évidence les flux et/ou les composants appariés, permettrait de résoudre ce problème.

En conclusion, le travail d'automatisation de détection des pistes de symbioses industrielles ne s'est pas révélé suffisamment concluant pour qu'un utilisateur non-expert puisse générer des résultats satisfaisants. Les opérations de tri nécessaires à l'obtention d'une liste réduite de pistes dont la probabilité de réalisation impliquent l'intervention d'un utilisateur expert. Celui-ci, impliqué dans la collecte des données, leur mise en forme et dans l'analyse des correspondances, occupe toujours une place centrale dans le fonctionnement de l'interface confirmant ainsi le rôle de SymbioGIS comme outil d'accompagnement.

3.4.1.3 Visualisation des symbioses industrielles (F 6 et F 10, Section 3.3.3)

Le choix de la technologie utilisée pour l'interface cartographique, MapServer for Windows (ms4w)³⁷, remonte au travail d'Albin Viquerat réalisé en 2008. MapLab, le composant utilisé pour afficher et manipuler les cartes n'est aujourd'hui plus mis à jour par son concepteur. L'utilisation d'un logiciel ancien ne pose pas de problèmes en soi mais MapLab a révélé trois limitations pouvant motiver son remplacement. Premièrement, les couches et les données sont définies de manière statique dans le *mapfile*. Celui-ci décrit les formes géométriques pouvant être dessinées sur les cartes, les couleurs utilisées, ainsi que les couches disponibles. Le nombre de couches ainsi que leur nom est également fixé. Ces éléments limitent le potentiel de développement de l'interface cartographique. Deuxièmement, contrairement aux interfaces modernes permettant de naviguer et de zoomer dans la carte en utilisant la souris et sa molette, le MapServer impose l'utilisation d'une barre d'outils. L'affichage et le masquage des différentes couches requièrent de charger une nouvelle carte. Troisièmement, les images sont générées

³⁷ www.mapserver.org

statiquement. Toutes les couches sont agrégées avant l'affichage en une seule image de format PNG. Aucune information spécifique à une couche n'est donc disponible au niveau du navigateur. En particulier, l'outil de requête « Query » provoque la génération d'une nouvelle image et nécessite l'ouverture d'une nouvelle fenêtre contenant la description de l'élément sélectionné. Les versions plus récentes de MapServer permettent de remédier à l'essentiel de ces trois problèmes.

L'interface actuelle de visualisation, directement liée à la gestion de la base, semble adaptée pour servir de support à des actions de sensibilisation et de communication. La clarté de la présentation des résultats pourrait néanmoins être améliorée par l'introduction d'une représentation schématique des correspondances de substitution et de mutualisation destinée à augmenter leur lisibilité. Les représentations schématiques de symbioses industrielles proposées dans ce travail de recherche ont été réalisées manuellement grâce au logiciel Omnigraffle. Des logiciels, tels que GraphViz³⁸, permettraient d'automatiser leur réalisation directement dans l'interface.

En ce qui concerne l'interface de visualisation du contenu des tables *substitutions*, *input mutualisation* et *output mutualisation*, l'affichage fragmenté des bilans de flux et des correspondances complique le travail de l'utilisateur. A cause du nombre important de données qu'ils contiennent, il n'existe pas de moyen simple de voir en une fois toutes les données relatives à une entreprise. L'interface propose soit une visualisation partielle dans l'interface d'importation/exportations, sans affichage des caractéristiques techniques des flux, soit l'affichage de l'ensemble des attributs par flux lorsque celui-ci est impliqué dans une symbiose. Un travail supplémentaire doit être réalisé sur la convivialité, la navigabilité et la présentation de l'interface pour faciliter l'accès aux nombreuses données contenues dans la BD.

3.4.1.4 *Gestion des entreprises, identification des puits et sources, et création de zones tampons (F 6, F 7 et F 10, Section 3.3.4)*

Dans la version actuelle, l'utilisateur doit sélectionner un à un les entreprises et les codes NOGA qu'il désire afficher. Il n'est par exemple pas possible de générer automatiquement une carte affichant toutes les entreprises possédant un bilan de flux ou de définir des projets regroupant une liste d'entreprises intéressantes ou certains secteurs d'activité. Ces possibilités devront être ajoutées pour faciliter la navigabilité et les requêtes liées aux données.

En ce qui concerne les informations sur l'entreprise contenues dans les tables *entreprises* et *contacts*, la pertinence de la gestion des données de contacts directement dans SymbioGIS n'est pas manifeste. Dans de nombreux cas, ces informations font en effet double usage avec les autres outils de gestion des contacts déjà en possession des utilisateurs. Une solution consisterait à ajouter une fonctionnalité permettant d'importer et d'exporter des fichiers de contacts depuis d'autres logiciels.

³⁸ <http://www.graphviz.org>, site consulté le 7 juin 2010.

Les fonctionnalités F 6, F 7 et F 10 n'ont été que partiellement implémentées. Les analyses doivent être réalisées pour l'essentiel de manière visuelle à partir des buffers et de l'affichage des couches thématiques. Les exemples présentés dans le cas de Genève montrent cependant que l'automatisation de certaines fonctionnalités sous forme de script permettrait d'enrichir la détection de potentiels d'optimisation des flux de matière et d'énergie, et les recommandations liées à l'organisation du système industriel. Dans le cas de la recherche d'un emplacement optimal pour une nouvelle activité, il serait possible de générer une *heatmap* affichant la localisation optimale d'une entreprise dans une région donnée en fonction de ces flux de matière.

Ces fonctionnalités sont destinées à un utilisateur expert et non à l'information et à la sensibilisation du grand public. Ainsi, il serait plus pertinent de les développer directement dans un logiciel SIG comme ArcGIS ou Manifold. Il n'apparaît donc pas nécessaire d'analyser plus avant les enseignements techniques apportés par SymbioGIS à ce stade. En première analyse, ArcGIS semble offrir le meilleur potentiel pour le développement de scripts spécifiques pour les fonctionnalités F 6, F 7 et F 10.

3.4.1.5 *Éléments pour la gestion de projets (F 9, Section 3.3.5)*

Le tri des appariements réalisés pour l'étude de cas de Genève a exploité la possibilité offerte par le champ *rating* de la table *substitutions* afin d'afficher les pistes en fonction de leur faisabilité, et de placer en fin de liste les doublons et les correspondances impossibles sans pour autant les effacer de la table. Ce système s'est révélé performant pour classer les pistes détectées sans perdre d'information.

Cependant, un seul champ à renseigner limite fortement l'utilisation de SymbioGIS pour gérer l'avancement de projets de terrain, depuis le tri des pistes jusqu'aux étapes de mise en œuvre de la solution sur le terrain. Les fonctionnalités propres à la gestion de projets qu'il serait intéressant de développer sont multiples et devront à l'avenir venir s'ajouter aux seuls champs *rating* et *commentaire*. Premièrement, plusieurs champs pour l'évaluation technique, économique, légale et environnementale (Section 2.4) permettraient à la BD de devenir la mémoire de la faisabilité des correspondances en permettant à l'utilisateur d'entrée des données et de commentaires dans chacun de ces domaines. Deuxièmement, la création d'attributs renseignant sur l'état d'avancement de la mise en œuvre de la symbiose permettrait à l'ensemble des acteurs d'un projet d'être informés continuellement de l'avancée des démarches sur le terrain. Chaque paramètre pourrait faire l'objet de deux champs, un premier reprenant le système de notation des indicateurs présentés en Annexe 2, et un second destiné à accueillir les commentaires de l'expert.

Cette fonctionnalité, bien que prometteuse, n'est pas fiable dans l'implémentation actuelle et devra faire l'objet de nouveaux développements. En effet, la suppression d'un flux dans un bilan ou la réimportation d'un bilan après modification implique actuellement que les tables stockant les correspondances soient générées à nouveau. Ainsi, les informations des attributs des tables *substitutions*, *input mutualisations* et

output mutualisations sont supprimées lorsque les flux et composants associés sont supprimés. Les solutions proposées pour remédier à ce problème sont détaillées à la Section 3.4.1.1.

3.5 DISCUSSION : LE POTENTIEL DE SYMBIOGIS POUR LA PLANIFICATION TERRITORIALE

SymbioGIS a démontré tout au long de ce chapitre que ses fonctionnalités, même celles dont le développement n'est pas encore abouti, recelaient un potentiel important pour soutenir les processus de décision dans ce domaine. Les trois hypothèses énoncées dans la Section 3.1.3 ont été confirmées par le travail de développement réalisé et par une application au cas du canton de Genève :

- SymbioGIS constitue un premier pas pour faciliter l'intégration des flux de matière et d'énergie dans les systèmes d'information du territoire. Le logiciel a montré sa capacité à stocker et traiter des données systématiques et déductives.
- L'application au cas du canton de Genève confirme que SymbioGIS permet de lier des informations non spatiales contenues dans une base de données avec les données spatiales du territoire.
- SymbioGIS, accessible directement via une plateforme web, permet à différents types d'acteurs d'accéder à plusieurs niveaux d'information : audits, symbioses potentielles, organisation du territoire.

SymbioGIS s'est donc révélé un outil pertinent pour la problématique de cette recherche et les résultats obtenus pour Genève sont généralisables, valables et transposables pour d'autres territoires. Néanmoins, plusieurs points faibles ont été identifiés. Ils ne sont pas liés au développement technique du logiciel à proprement parler, mais à la faiblesse de la nomenclature utilisée pour décrire les flux et les composants. Son influence sur la pertinence des résultats est décisive. Dans son état actuel de développement, la qualité du logiciel, et principalement la détection de symbioses industrielles, dépend d'un élément extérieur. La nomenclature des familles de flux, des flux et des composants utilisée pour le projet pilote de Genève, utilisé ici comme l'étude de cas, est dérivée des travaux menés en collaboration avec Systèmes Durables et le logiciel Presteo, s'est révélée en même temps trop rigide et trop souple, rendant le tri des pistes détectées fastidieux et incertain. La classification en trois niveaux facilite la gestion des données, mais l'absence de règles liées aux synonymes et à la multiplicité des flux pouvant remplir une même fonction rend la détection automatique des correspondances peu performante. De plus, lorsque des bilans de flux très complets sont entrés dans la base de données, le nombre de résultats, et particulièrement de faux positifs, générés par le script d'identification des correspondances est considérable. Cela implique un travail de tri important, et ce malgré la diminution des types d'appariement recherchés (Section 3.3.2.3). L'utilisateur peut ainsi, s'il le désire, choisir lui-même une nomenclature appropriée pour qualifier les flux et les composants lors de la création des bilans d'audit.

Ces considérations confirment qu'il est nécessaire de créer une nouvelle nomenclature pour les futurs travaux. Les conclusions de la Section 3.3.2.3 permettent d'énoncer des pistes de réflexion. Premièrement, la nomenclature de certains flux sortants est spécifique et ne correspond pas à celle des

entrants. Par exemple, un flux sortant *effluent gazeux* ne correspond pas au flux entrant *air chaud*, ou un flux sortant *eau industrielle* ne correspond pas aux entrées d'*eau potable* ou *eau non-potable*. Deuxièmement, le degré de précision des noms de flux ou des composants est parfois trop important ou diffère d'une occurrence de flux ou d'un composant à l'autre : un flux sortant de *cendre végétale* ne correspond pas à l'entrée de *cendre volante*, un rejet de *peinture* ne correspond pas aux flux entrant d'*oxyde ferrique* et d'*oxyde chromique*. L'exemple de la peinture et des oxydes révèle que le problème peut venir d'un manque de précision incombant à la collecte des données, si l'auditeur ne prête pas attention à ces détails lorsqu'il collecte et formate les données. Le problème se pose également lorsqu'une synergie de substitution serait intéressante pour un type de produit avec une certaine caractéristique ou fonction globale (acide, alcool, composé azoté, etc.) et que les noms de flux et de composants sont plus précis (acide nitrique, acide phosphorique, éthanol, méthanol, nitrate, nitrite, etc.). Troisièmement, la substitution par un autre matériau, soit un autre nom de flux pouvant remplir la même fonction, n'est pas détectable car la nomenclature actuelle ne gère pas les synonymes. Seul l'expert peut adapter certaines données dans ce sens lors de l'élaboration de bilans. La création d'un champ permettant de mentionner les synonymes et les flux pouvant remplir la même fonction permettrait de remédier partiellement à ce problème.

Finalement, un paramètre important de la future nomenclature consistera en son adaptabilité à différentes thématiques et à différentes échelles. L'architecture de la base de données est actuellement centrée sur le traitement de l'information en provenance d'une entreprise ou d'un site de production. Or, cette approche pourrait être étendue à la gestion de bâtiments et de parcelles. SymbioGIS représenterait alors un embryon de ce que pourrait être un système d'information du territoire complet. De plus, le logiciel n'intègre pas d'informations permettant de détecter des potentiels d'optimisation internes, soit au niveau du procédé, selon les principes de la production plus propre. La méthodologie d'audit développée dans la Section 2.3 pose cependant les bases d'une telle analyse et l'attribut *process* de la table *flows* renseigne sur le procédé dans lequel chaque flux est engagé. Les perspectives dans ce domaine sont importantes mais n'ont pas été abordées dans ce chapitre.

En suivant les principes de l'écologie industrielle, l'interface actuelle se limite aux interactions possibles entre les éléments et infrastructures du territoire en partant du principe que chaque activité économique interagit avec d'autres entités par l'intermédiaire de flux de matière et d'énergie. Ces échanges sont cependant réalisables à des échelles différentes en fonction des flux et des activités considérées. Le recours aux systèmes d'information géographique permet de s'adapter à l'échelle pertinente pour chaque famille de flux ou pour chaque flux. Les fonctionnalités détaillées dans la Section 3.3.4 s'appuient sur cette flexibilité.

En détaillant cette considération pour les trois thématiques que sont l'énergie, l'eau et les autres flux de matière, il est possible de définir des échelles préférentielles. Dans la perspective des symbioses industrielles, la problématique de l'énergie doit être considérée dans un espace géographique restreint. La substitution de combustibles fossiles par des ressources endogènes est possible si un potentiel existe

dans les environs immédiats du lieu considéré (géothermie) ou en transitant par le réseau de distribution classique (photovoltaïque, éolien, biogaz). La valorisation des rejets thermiques d'une entreprise ne peut être réalisée que par une activité ou un bâtiment situés dans un rayon de un à deux kilomètres. Au delà, les coûts liés aux infrastructures sont considérés comme trop importants. Une exception concerne les réseaux d'échange de chaleur de grande capacité, comme les réseaux de chauffage à distance, qui peuvent être envisagés à l'échelle du quartier. Ces considérations seront reprises dans la Section 4.4.12.

La situation est similaire dans le cas de l'eau. En Suisse, pays disposant d'une ressource abondante, substituer l'eau potable par une eau issue des nappes souterraines et superficielles ou par de l'eau de surface n'est pertinent que si la source est située dans les environs immédiat de l'utilisateur. Pour des raisons de coûts et de disponibilités foncières, la détection de potentiel d'utilisation en cascade de l'eau implique à nouveau une connaissance approfondie des environs immédiats de la source. Le recours au SIG dans ce cas est nécessaire.

La problématique des autres flux de matière, solides ou liquides, est plus complexe. Les fonctionnalités apportées par SymbioGIS varient en fonction des flux considérés, la valorisation de certains co-produits impliquant parfois des transports internationaux et même intercontinentaux. L'échelle géographique à prendre en compte est donc beaucoup plus large. Elle dépend premièrement du flux et du secteur d'activité et, deuxièmement, de la richesse et de la diversité des activités économiques présentes dans les limites du territoire considéré. Le logiciel a alors montré son potentiel pour réaliser non seulement une détection exhaustive des synergies industrielles potentielles entre les activités économiques, mais également pour sélectionner d'intermédiaires (collecte, traitement, valorisation des déchets) permettant de minimiser les transports. Si cette fonctionnalité semble très prometteuse, l'échelle du canton de Genève s'est avérée trop petite. Les activités présentes sur le territoire cantonal dans ce domaine se limitent le plus souvent à la collecte et au conditionnement des déchets issus des entreprises. Ceux-ci sont ensuite majoritairement valorisés à l'extérieur du territoire cantonal. Une approche pertinente de cette problématique imposerait de travailler à une échelle supérieure comme la Suisse romande, la Suisse, et même dans certains cas, l'Europe.

Les constatations précédentes sur les différentes échelles d'action démontrent une nouvelle fois que les fonctionnalités de SymbioGIS sont pertinentes pour étudier les synergies industrielles sur un territoire. Certaines fonctionnalités ne sont à l'heure actuelle pas aussi puissantes que le modèle mathématique développé par Özyurt et Reallf (2002) pour les co-produit de l'agriculture. Les possibilités de développement sont nombreuses, en plus de celles présentes dans la Section 3.4 sur les limites techniques. La plus prometteuse consisterait à développer l'architecture de la BD afin de permettre de lier des informations relatives aux flux de matière à des éléments contenus dans les couches thématiques géoréférencées (points, polygones). Le potentiel est important concernant les bâtiments (habitat et espaces commerciaux) et les parcelles (agriculture et exploitation forestière). A titre d'exemple, la connaissance de la production annuelle de biomasse exploitable pour la production d'énergie renouvelable ou des besoins en eau pour l'irrigation, par parcelle, permettrait une analyse approfondie

des potentiels de mutualisation et représenterait un atout important pour la réalisation d'étude d'analyse de flux de matière et d'énergie et la mise en œuvre d'une comptabilité physique détaillée.

Ces considérations touchent directement au domaine de l'aménagement du territoire, du ressort des cantons. Le territoire Suisse est étroit et l'occupation du sol y est très fractionnée. Les activités économiques y sont diversifiées et fortement dispersées sur l'ensemble du plateau. Les cantons ont de très fortes prérogatives en matière de planification territoriale et de gestion des déchets urbains mais les frontières cantonales n'arrêtent pas les transferts des matières premières et des co-produits d'entreprises. Lors de l'application sur le territoire genevois, SymbioGIS s'est surtout révélé pertinent pour les familles de flux eau et énergie et le plus souvent à l'échelle du quartier. Le Service de l'énergie (ScanE) du canton de Genève l'a d'ailleurs bien compris. Depuis plusieurs années, il développe un concept de planification énergétique territoriale destiné à atteindre les objectifs de la société à 2000 Watts (Marechal, Favrat et al. 2005). Pour soutenir ces actions, un système d'information à l'échelle du bâtiment, appelé Portail Energie, est en cours de développement. Il est destiné à mieux gérer la consommation d'énergie et les mesures d'optimisation permettant de la réduire et de favoriser l'utilisation des énergies renouvelables endogènes. La complémentarité avec SymbioGIS, qui englobe un champ plus large mais qui est moins précis dans le domaine de l'énergie, est évidente. EnerGIS, un logiciel développé pour des applications comme la planification énergétique territoriale et servant de base du développement du portail, possède une base de données permettant d'évaluer la consommation d'énergie moyenne en fonction du type de bâtiment (Girardin, Marechal et al. 2010).

La même approche est d'ailleurs pertinente dans le cas de l'eau. Les études menées par le groupe de travail Ecosite, sans utilisation de SymbioGIS, ont montré que certaines activités pouvaient être positionnées sur le territoire en fonction des ressources endogènes disponibles et que certaines concentrations d'entreprises présentaient des potentiels pour une utilisation en cascade de l'eau (Carvalho et Massard 2010). L'exemple de la Section 3.3.4.1 a montré que le logiciel était apte à remplir cette fonction.

Comme mentionné précédemment, la logistique de nombreux autres flux de matière dépasse les limites administratives, ce qui implique d'étendre les limites du système considéré. Certains flux, comme les produits chimiques, ont été étudiés à l'échelle du canton, par exemple pour leur valorisation dans les activités de traitement des eaux, mais l'extension du périmètre de recherche permettrait de mettre en évidence des solutions supplémentaires. Les fonctionnalités permettant de conseiller les entreprises sur le choix d'un repreneur de déchets approprié et sur la position du site optimal pour une nouvelle activité semblent offrir les meilleurs potentiels à l'heure actuelle. L'extension de l'interface à un espace géographique plus large permettrait de traiter l'ensemble des problématiques au sein d'un seul logiciel. L'approche systémique mais généraliste de SymbioGIS permettrait d'ouvrir de nouvelles perspectives en servant de plateforme centralisée à d'autres programmes complémentaires, comme EnerGIS. De plus, de nombreuses symbioses industrielles inter-cantonales existant déjà (Sections 4.2 et 4.3), le développement d'un SymbioGIS intégrant l'ensemble des cantons romands et même l'ensemble de la Suisse, en lien

avec les propositions liées à la création d'une plateforme romande pour soutenir l'émergence des symbioses industrielles (Section 2.7.2) permettrait non seulement de mettre en lumière de nouvelles opportunités mais également de sensibiliser les acteurs économiques par l'intermédiaire de l'interface accessible au grand public. Le potentiel de l'outil pour la communication, la sensibilisation et l'intégration des flux de matière dans les processus de décision s'en trouveraient décuplés.

Il ne semble pas pertinent non plus de se limiter à la détection exhaustive de pistes en se basant sur des bilans de flux les plus complets possibles. Cette approche a également montré ses limites. La mise en évidence des flux faisant déjà l'objet de symbioses industrielles sur d'autres territoires directement en lien avec la terminologie et les secteurs d'activité concernés, permettrait d'une part à l'expert de terrain de se concentrer sur les pistes les plus prometteuses et d'autre part de faciliter le processus de sensibilisation en vue de leur reproduction. Cette fonctionnalité demande un nouveau développement de la BD afin d'intégrer une veille technologique. Une revue de littérature des projets en cours dans le monde a permis d'identifier plusieurs dizaines d'échanges à fort potentiel. Le développement d'un script spécifique destiné à détecter les situations dans lesquels ils seraient reproductibles permettrait d'éviter une recherche exhaustive fastidieuse dans les premières étapes d'un projet.

3.5.1.1 *Comment aller plus loin ?*

Quels seraient les acteurs susceptibles de soutenir un projet sur l'ensemble du territoire romand ou Suisse ? Comme dans le cas de la plateforme proposée dans le Chapitre 2 (Section 2.7.2), les partenaires potentiels sont les administrations cantonales, les Chambres du commerce et de l'industrie (CCI) ou la Fédération des entreprises romandes (FER). Certains organes plus récents, comme la nouvelle entité de promotion économique de la Suisse romande, utilisant la dénomination Greater Geneva Bern Area, la plateforme CleantechAlps, et la Conférence romande des responsables de la protection de l'environnement (CREPE) pourraient également représenter des partenaires de choix. Au niveau Suisse, les services de l'administration fédérale pourraient également remplir ce rôle. Les premiers défis, outre le fait de devoir convaincre ces acteurs de la pertinence de cette approche, consisteront à créer un groupe d'accompagnement équilibré et pluridisciplinaire et à harmoniser les données géoréférencées disponibles dans tous les cantons. A titre d'exemple, de nombreux cantons ne disposent pas à l'heure actuelle d'une base de données géoréférencée des activités économiques inscrites au registre du commerce. Dès les premières réflexions, la problématique de la mise à jour de ces données, pour garantir la pertinence des analyses réalisées, devra être abordée.

En élargissant le champ de vision, une application à la Suisse entière permettrait également de tester les capacités du programme à gérer des territoires fortement industrialisés de grande taille comme il en existe en Chine, au Japon, en Corée ou au Brésil. Les échelles considérées sont alors complètement différentes. Ces pays ont développé ces dernières années des programmes d'écologie industrielle, principalement par l'intermédiaire de projets de création de parcs éco-industriels (Park, Rene et al. 2008; Elabras Veiga et

Magrini 2009; Geng, Zhang et al. 2009; van Berkel, Fujita et al. 2009; Shi, Chertow et al. 2010). Or, deux visions différentes du développement de ces parcs et plus généralement des symbioses industrielles s'opposent depuis les années nonante. Le premier est un modèle de planification de parc éco-industriels destiné à favoriser la création et l'organisation de nouveaux parcs en tenant compte d'un certain nombre de règles, dont certaines sont issues de l'écologie industrielle. Ce modèle a montré ces limites dans le contexte culturel américain dans les années nonante, sous l'impulsion du Président Council for Sustainable Development de l'administration Clinton (Gibbs et Deutz 2005). L'approche considérée alors s'était avérée trop restrictive pour les milieux économiques. Partir de zéro pour construire un complexe industriel aux impacts environnementaux réduits et utilisant les ressources de manière efficace, sans considérer leur intégration avec l'ensemble des infrastructures et des activités existantes, semble effectivement réducteur. Par opposition, le deuxième modèle consiste à observer l'émergence naturelle de symbioses industrielles sur un territoire. Il s'agit d'un modèle d'auto-organisation se développant uniquement sous l'impulsion des principes de l'offre et de la demande et des décideurs du secteur privé (Chertow 2007). Ce n'est que très récemment que Chertow a admis qu'une forme de soutien peut se développer en se basant sur des expériences pré-existantes mises au jour sur le territoire considéré (Chertow 2009). L'Université de Curtin, en Australie, qui soutient les projets en cours dans la zone industrielle de Kwinana, utilise cependant cette approche depuis plusieurs années grâce à des financements mixtes publiques et privés (van Beers, Bossilkov et al. 2005; van Beers, Corder et al. 2007; van Beers et Biswas 2008). Le programme Eco-Town, au Japon, financé par des fonds publics, peut, quant à lui, être décrit comme un projet de politique public (van Berkel, Fujita et al. 2009). L'importance des acteurs du territoire, privés et publics, pour favoriser l'émergence des symbioses industrielles fait d'ailleurs l'objet de nombreuses recherches depuis quelques années (Baas et Boons 2004; Ashton 2008; Baas 2008; Boons et Howard-Grenville 2009; Brulot-Dermine 2009; Costa, Massard et al. 2010).

SymbioGIS permet d'impliquer les acteurs publics et privés dans la prise de décision concernant l'organisation des activités économiques. Les possibilités offertes par le logiciel constituent un troisième modèle : celui de l'action concertée et planifiée intégrant l'ensemble des parties. L'administration publique du canton de Genève, et en particulier l'Office de l'environnement, s'est attelée à faire de l'optimisation de l'usage des ressources un principe central de la politique énergétique en développant elle-même les premières expériences en lien avec des organismes académiques. Ce troisième modèle est également différent de celui de Kwinana car Genève présente une forte mixité de logement, d'agriculture et d'habitat (Chapitre 4). Un territoire plus diversifié signifie qu'il y a donc plus d'opportunités à détecter et qu'elles sont plus variées, ce qui renforce l'utilité d'un logiciel d'aide à la décision comme SymbioGIS. En résumé, le logiciel multi-utilisateurs développé dans le cadre de cette recherche est particulièrement adapté pour des projets intégrant des actions publiques proactives, visant à orienter le développement futur d'un territoire à forte mixité vers un écosystème industriel mature, intégrant pleinement les ressources renouvelables disponibles sur son territoire.

3.6 CONCLUSION

Le système d'information décrit dans ce chapitre a pour objectif de favoriser l'émergence d'un écosystème industriel mature en aidant à la détection et à l'évaluation de symbioses industrielles. SymbioGIS a démontré tout au long de ce chapitre que ses fonctionnalités, même celles dont le développement n'est pas encore abouti, recelaient un potentiel important pour soutenir les processus de décision dans ce domaine. La base de données permet la détection des synergies par détection de correspondances entre des noms de flux et de composants liés aux activités économiques. Les tables de résultats sont mises à jour automatiquement à l'insertion de nouvelles données. Ainsi, la liste des synergies potentielles, par entreprise ou par secteur d'activité, est toujours synchronisée avec les informations contenues dans la base. Pour ce faire, celle-ci est capable d'importer, de stocker et d'exporter des bilans de flux de matière et d'énergie pour tous les types d'activités économiques, pour autant qu'elles soient référencées dans l'interface comme activités économiques des secteurs primaire, secondaire et tertiaire.

Les données, d'origine systématique et déductive, constituent la source première d'information. Plusieurs fonctionnalités exploitant directement des données de flux ont montré que la détection de correspondances ne constituait cependant pas une fin en soi. Les systèmes d'information géographique étendent les fonctionnalités liées à la détection de synergies en intégrant l'ensemble des éléments d'un territoire. La principale valeur ajoutée du logiciel par rapport aux logiciels précédents et aux connaissances d'un expert sur le terrain réside dans la possibilité de visualiser les puits et les sources de flux en générant des buffers de distance et de les superposer à des données spatiales. Ces fonctionnalités sont cependant fortement dépendantes de la richesse des données géoréférencées disponibles sur le territoire considéré.

Ainsi, SymbiosGIS apparaît comme un logiciel approprié pour soutenir les politiques publiques et l'aménagement du territoire à grande échelle. Son utilisation sur d'autres territoires implique cependant qu'il soit utilisable dans plusieurs langues. La traduction de l'interface à proprement parler ne semble pas représenter un défi majeur. Tous les derniers développements ont d'ailleurs été réalisés en anglais, mais certaines parties provenant de l'implémentation originale sont encore en français. La nomenclature, par contre, constitue un enjeu important pour deux raisons. Premièrement, la traduction de la nomenclature dans une autre langue que le français implique de prendre en considération les particularités culturelles du territoire considéré concernant le système industriel et sa description. Deuxièmement, le jonglage entre les langues sera parfois nécessaire, particulièrement dans le cas d'entités économiques actives dans plusieurs pays. L'architecture retenue devra permettre d'intégrer plusieurs langues et de gérer les contraintes de traduction, ainsi que celles liées aux synonymes. Une première approche du multilinguisme consisterait à développer une procédure pouvant être capable d'associer le mot *wasser* avec le mot *aqua* ou *eau*, mais également *inox* avec *acier inoxydable*. La solution pourrait provenir d'une terminologie codée

avec des identifiants numériques. Lors de l'importation de données, le système peut alors convertir le nom présent dans le fichier en un identifiant équivalent qui sera lui stocké dans la table. Ce travail devra être réalisé dans le cadre d'une nouvelle recherche destinée à créer une nomenclature plus robuste. Il s'agit donc ni plus ni moins de créer une nomenclature internationale des flux de matière et d'énergie. L'enjeu est de taille. Une première réflexion a été menée à l'IPTEH en ce qui concerne les procédés industriels par Priti Nigam, dans le cadre d'un travail de diplôme EPFL (Nigam 2007).

Le deuxième enjeu pour l'utilisation de SymbioGIS au niveau international concerne le choix d'un logiciel spécialisé, en plus de l'interface web, pour le développement des fonctionnalités complexes destinées à l'utilisateur expert. Les choix techniques originaux se sont focalisés sur une architecture tricéphale incluant la base de données, l'interface web et un logiciel spécialisé. Le coût d'achat de ce dernier élément, et en particulier ArcGIS, le plus puissant d'entre eux, risque de diminuer le nombre d'acteurs et de territoires franchissant le pas vers une planification territoriale intégrant l'écologie industrielle. Les futurs travaux de recherche devront revenir sur cette question avant d'initier des développements de grandes ampleurs. Par exemple, ArcGIS pourrait servir d'outil de développement et de test des nouvelles fonctionnalités avant leur développement dans l'interface internet.

Finalement, il existe un problème de disponibilité des données géoréférencées dans certains pays. La puissance du logiciel actuel repose en grande partie sur les données disponibles en complément de celles recueillies directement dans ce but par l'intermédiaire d'audits des chaînes de production. La Suisse et ses cantons, cadre dans lequel SymbioGIS a été développé, possèdent des systèmes d'information du territoire très développés. Les données sont abondantes, de bonne qualité et facilement accessibles en cas de collaboration avec les administrations cantonales. Situé à quelques kilomètres de Genève, le contexte français est déjà très différent : la grande majorité des données sont créées et mises à jour par des organismes privés et leur accès est payant, même pour les organes de l'administration publique. Qu'en est-il de la Chine où les données détaillées n'existent à l'heure actuelle pratiquement pas ? Une solution consisterait à développer une interface web s'appuyant sur l'outil « Google map », qui présente l'avantage d'être gratuit et public. Cependant, les possibilités de développement de fonctionnalités s'en trouveraient réduites car l'interface de Google n'offre pas beaucoup de possibilité de développement et d'affichage de couches thématiques importées.

Développer un système d'information destiné à intégrer une nouvelle dimension dans la problématique complexe de l'organisation du territoire n'est pas une tâche aisée. Les travaux du groupe de travail Ecosite de l'Agenda 21 du canton de Genève ont permis de développer un prototype. Dix fonctionnalités ont été identifiées comme prometteuses dont huit ont été au moins partiellement développées dans le cadre du présent travail de recherche. Leur test sur des portions du territoire genevois a confirmé leur pertinence, de même que la nécessité de poursuivre le travail de développement.

Le logiciel pilote développé a deux atouts. Premièrement, il serait très pertinent dans certains cantons suisses et à l'échelle intercantonale, nationale ou internationale. Deuxièmement, les développements actuels se limitant à une interface web de gestion de la base de données, il est accessible et adaptable au

monde entier, pour autant qu'il dispose d'une interface multilingue et que le territoire considéré possède des informations spatiales. Au vu du panel de fonctionnalité qu'un tel système peut contenir, il s'inscrit par ailleurs très bien dans la nouvelle tendance des *Service Oriented Architecture*³⁹ qui consiste à créer des bibliothèques de fonctionnalités en lien avec des problématiques spécifiques comme la gestion des risques ou le commerce en ligne.

³⁹ <http://www.eu-orchestra.org>, site consulté le 05 mai 2011

Chapitre 4.

IDENTIFICATION ET ANALYSE DE FAISABILITE DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES DANS LE CONTEXTE SUISSE

4.1 INTRODUCTION

Les Chapitre 2 et Chapitre 3 expliquent comment détecter et évaluer des symbioses industrielles sur un territoire. En particulier, les critères de faisabilité et de pertinence décrits dans la Section 2.4 demandent de comprendre le fonctionnement du système économique. Dans un système industriel aussi développé que celui qui existe en Suisse, de nombreux cheminements possibles pour les flux de matière et d'énergie cohabitent. Depuis les débuts de la Révolution industrielle, la Suisse a développé son système industriel en fonction des ressources naturelles dont elle disposait sur son territoire et des solutions de valorisation des déchets adaptées aux activités économiques présentes. La description du contexte législatif suisse proposée dans la Section 2.4.2 a fourni des informations sur les orientations stratégiques de la gestion des déchets. Les différentes solutions peuvent être caractérisées en se référant aux définitions proposées par la hiérarchie des déchets, présentée dans le Chapitre 1.

Il existe essentiellement trois cheminements pour un déchet produit par un ménage ou une entreprise (Figure 54). Le premier consiste simplement à déposer en un lieu donné les matières dont l'économie n'a plus besoin en les mettant dans des décharges. Bien qu'elle ait été interdite pour bon nombre de déchets, cette filière reste aujourd'hui encore inévitable pour certains types de sous-produits et produits résiduels, comme les matériaux de démolition ou les substances chargées en polluants ne pouvant être incinérées. Deux types de décharge existent en Suisse : les *décharges contrôlées pour matériaux inertes* (DCMI) et les *décharges contrôlées bioactives* (DCB).

Le deuxième cheminement consiste en l'incinération des déchets. En Suisse, où cette pratique est très courante, la plupart des incinérateurs sont équipés de systèmes de valorisation de la chaleur (production d'électricité et réseaux de distribution de la chaleur). La valorisation énergétique des déchets urbains et de certains déchets spéciaux se pratique dans des *unités d'incinération* (UI). La plupart traitent uniquement les ordures ménagères (Unité d'incinération des ordures ménagères, UIOM), mais certaines sont conçues pour le traitement des déchets spéciaux (Section 1.6.2.2).

Le troisième circuit consiste en une transformation du déchet (recyclage). Un recycleur est une entité économique particulière dont l'objectif commercial est de récupérer puis de transformer les co-produits et sous-produits des entités économiques classiques en matière première secondaire ou en un produit commercialisable (Section 1.6.1.3).

Les symbioses industrielles constituent dès lors un quatrième circuit de réutilisation/valorisation des déchets qui permet l'échange direct entre deux entités économiques, sans passer par un processus de transformation (recyclage). La présence d'intermédiaires pour la collecte, le transport ou le reconditionnement est cependant possible. La Figure 54 permet de visualiser ce cheminement.

Il est important de préciser que même dans le cas des circuits 3 et 4, la plupart des matières premières secondaires finissent tôt ou tard dans les circuits 1 et 2 afin d'être incinérées ou mises en décharge. Le recyclage et les symbioses industrielles permettent de prolonger la durée de vie d'une ressource. Une utilisation complètement cyclique est très rarement réalisable. Nous reviendrons sur cette affirmation plus loin dans ce chapitre.

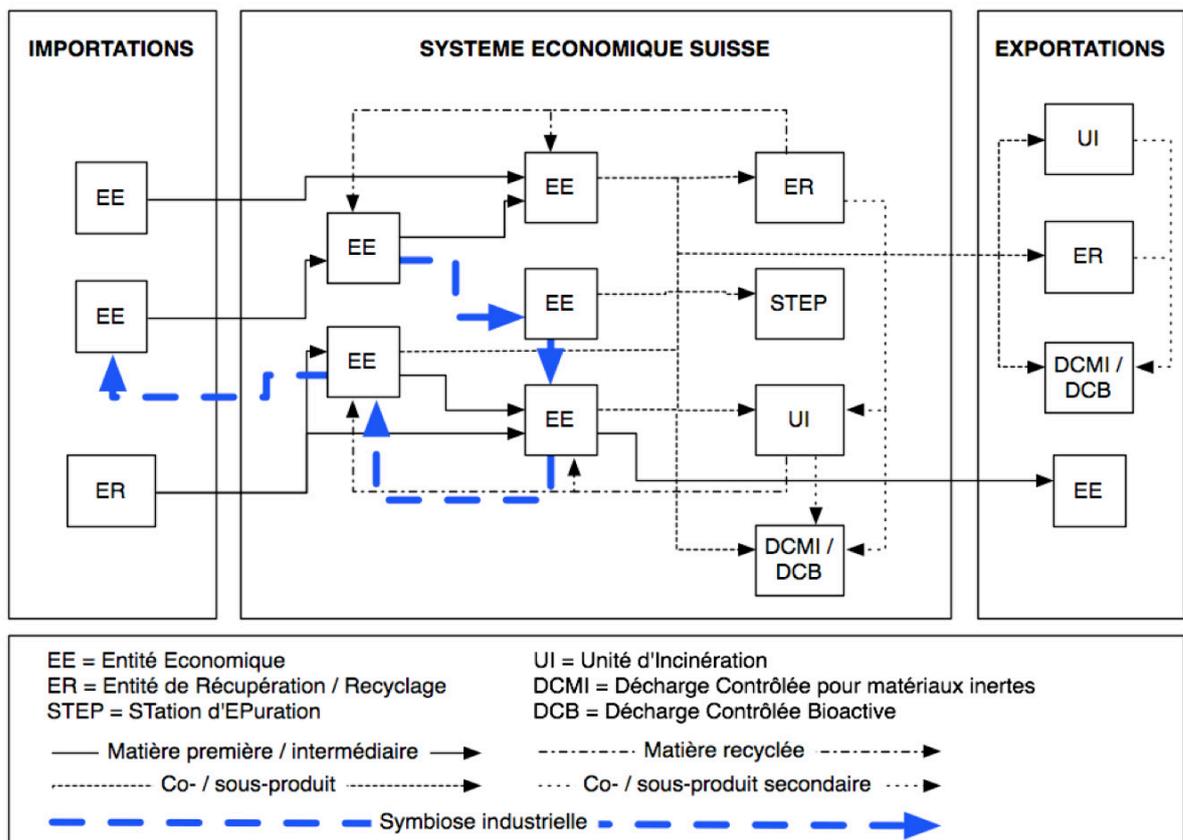


Figure 54 : Modélisation schématique des cheminements des flux de matière au sein du système économique suisse. Source : auteur.

Le cheminement (circuit 4) proposé pour les symbioses industrielles ne représente pas une nouveauté. D'ailleurs, la réutilisation et la collaboration entre différents secteurs d'activité existent depuis des

décennies (Desrochers 2002; Sathre et Grdzlishvili 2006). En Suisse, la législation autorise en effet certains échanges et réutilisation de déchets qui ont fait, comme nous allons le voir, l'objet de nombreuses expériences. Des exemples de mutualisation de services et d'infrastructures existent également. Ce qui est mis en avant dans cette recherche, c'est la nouveauté consistant en la création de nouvelles symbioses industrielles sur la base de critères de performance environnementale, en déterminant quelles sont les solutions permettant de minimiser les impacts sur l'environnement. Comme cela a été discuté dans la Section 1.4.3, les symbioses industrielles, au sens de l'écologie industrielle, sont voulues dans une perspective d'éco-efficacité et non basées uniquement sur des considérations économiques ou de difficulté d'accès aux ressources.

Les procédures décrites dans la Section 2.5 vont dans ce sens. Pour les soutenir, il peut être utile de se référer à des expériences existantes afin de motiver les acteurs économiques à s'investir d'avantage. Baas et Boons (2004), à partir de leur expérience en Hollande, proposent trois différentes étapes dans le développement de projets d'écologie industrielle pour la valorisation de friches industrielles :

1. *Efficacité régionale : prise de décision autonome des entreprises pour améliorer leur efficacité (essentiellement sur des critères économiques). Les pouvoirs publics peuvent servir de facilitateurs par l'intermédiaire de réseaux sociaux locaux. Dans le cadre de l'écologie industrielle, cette phase se caractérise par l'identification et l'utilisation des bonnes pratiques existantes.*
2. *Apprentissage régional : les considérations sur l'apprentissage organisationnel proposées dans le Chapitre 3 peuvent être reprises ici. En se basant sur un lien de confiance, les acteurs économiques échangent de l'information. D'autres intermédiaires et facilitateurs peuvent appuyer ces démarches.*
3. *Zone industrielle soutenable : les acteurs développent une vision stratégique de la durabilité et basent leurs activités sur celle-ci.*⁴⁰

Dans le domaine précis des symbioses industrielles, Chertow (2007) explique l'importance de ces bonnes pratiques pour accroître la volonté de collaborer au sein d'une communauté d'acteurs et aboutir à l'émergence d'un écosystème industriel plus soutenable. Elle conclut que :

⁴⁰ Traduction de l'auteur selon (Baas et Boons 2004) :

Based on these ideas, it is possible to come up with three different stages in the evolution of industrial ecology initiatives. For brown-fields, these are the following:

1. Regional efficiency: autonomous decision-making by firms; co-ordination with local firms to decrease inefficiencies (i.e. 'utility sharing'). Such activities may be facilitated by local government authorities, existing co-operative arrangements between entrepreneurs, in short: local social networks. This phase is characterised by identifying and make use of existing win-win situations.
2. Regional learning: based on mutual recognition and trust, firms and other partners exchange knowledge, and broaden the definition of sustainability on which they act. In this phase, other stakeholders (local citizens, grass roots movements) may become involved as well. Thus, both goal and range of membership broaden.
3. Sustainable industrial district: actors develop an— evolving—strategic vision on sustainability and base their activities on this vision.

Des échanges symbiotiques environnementalement et économiquement désirables se trouvent tout autour de nous. Les identifier et encourager l'émergence d'écosystèmes industriels promet de nombreux bénéfices environnementaux et d'autres sortes ⁴¹

Dans le cas de Kwinana, en Australie, la création du KIA (Kwinana Industrial Association) a également bénéficié de l'existence de collaborations pré-existantes. En s'appuyant sur ce réseau social et avec le soutien d'une institution académique, le Centre for Sustainable Resource Processing (CSRP), de nouvelles opportunités ont pu être détectées (van Beers, Corder et al. 2007).

Cependant, l'existence d'une symbiose industrielle ne constitue pas forcément une bonne pratique en termes d'efficacité environnementale. Les symbioses pré-existantes telles que discutées par Baas et Boons (2004) et Chertow (2007) ont été initiées sur des considérations le plus souvent d'ordre économique. Leur performance environnementale a parfois été étudiée longtemps après leur mise en œuvre. C'est le cas de Kalundborg, où les échanges existent depuis les années soixante, alors que la découverte de cette expérience par le monde académique date du début des années nonante (Jacobsen 2006). Or, il n'est pas évident qu'une symbiose industrielle constitue de facto la solution permettant de minimiser les impacts environnementaux du système considéré. A l'heure actuelle, l'innovation technologique est très rapide. De nouvelles solutions apparaissent constamment et les technologies existantes gagnent régulièrement en efficacité. Ainsi, s'il est intéressant d'utiliser des symbioses pré-existantes d'un territoire pour faciliter les échanges d'informations et développer la confiance, il n'est pas forcément pertinent de chercher à dupliquer toutes les expériences existantes. Pour éviter ce piège, il convient de rechercher la solution la plus éco-efficace en intégrant l'innovation technologique et organisationnelle. Ainsi, les critères d'évaluation proposés dans la Section 2.4, incluant des considérations techniques, légales, économiques et environnementales apparaissent également appropriées à l'étude des symbioses pré-existantes.

Le premier objectif de ce chapitre est donc de détailler les activités économiques ayant pris part aux études de cas et de décrire les symbioses pré-existantes détectées sur ces territoires (Sections 4.2.1 et 4.3.1). Cet énoncé des bonnes pratiques existantes, en matière de collaboration inter-entreprises, mais qui ne représentent pas toutes un optimal environnemental, est destiné à faciliter les contacts entre le coordinateur d'un projet et les entreprises du territoire considéré. Ces expériences, dont la liste n'est pas exhaustive, permettent de décrire l'écosystème industriel déjà existant sur le territoire considéré.

La motivation première de cette recherche est de fournir des outils pour détecter et mettre en œuvre les symbioses industrielles représentant une économie de ressources, une réduction des impacts environnementaux, ainsi qu'un gain d'efficacité pour les entreprises. Ainsi, le deuxième objectif de ce chapitre est de discuter et d'analyser les symbioses industrielles potentielles détectées par les

⁴¹ Traduction de l'auteur selon (Chertow 2007) :

Economically and environmentally desirable symbiotic exchanges are all around us. Identifying and fostering emerging industrial ecosystems offers the promise of many environmental and other benefits.

coordinateurs pour les deux études de cas. Les données concernant les flux entrants et sortants récoltées dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région ont été classées en 18 familles de flux, selon la nomenclature proposée dans la Section 2.3.1. Le Tableau 18 reprend cette classification en indiquant les familles de flux pour lesquelles des possibilités de symbioses industrielles ont été décelées en Suisse romande entre 2006 et 2009.

La détection de symbioses industrielles est fonction des secteurs d'activité présents sur le territoire considéré. Ainsi, certaines familles de flux ne présentent aucune solution dans le cadre de cette recherche. Les familles de flux boues (2), gaz (6), macromolécules (8), matériaux électroniques et informatiques (10), métaux (12), organismes vivants (14) et textiles et cuirs (17) ne sont pas traitées car aucune opportunité n'a été détectée au cours des études de cas. Cependant, cela ne signifie en aucun cas qu'il n'existe pas de possibilité de synergies pour ces familles. Dans d'autres cas, les filières de collecte et de valorisation sont déjà suffisamment efficaces ou une réutilisation serait impossible sans transformation du flux. C'est le cas, entre autres, des filières de recyclage des métaux et de collecte des déchets électroniques. Les métaux (12) sont collectés par des intermédiaires (collecteurs) et dirigés vers une entité du secteur de la production métallurgique pour y être refondus. La réutilisation directe des métaux entre les entités n'est pas possible en Suisse romande dans les conditions actuelles, le territoire ne contenant pas d'usine de production et de fonte des métaux mais uniquement des activités de transformation et de fabrication d'outils. En ce qui concerne les matériaux électroniques et informatiques (10), il n'existe pas non plus de filière de retraitement en Suisse : les produits usagés sont envoyés à l'étranger pour y être démontés, broyés et valorisés. Par contre, l'absence d'opportunités pour des échanges de boues (2), gaz (6), macromolécules (8), organismes vivants (14) et textiles et cuirs (17) résulte d'une part de la faible présence sur les territoires considérés d'activités utilisant ou rejetant ces flux et, d'autre part, de la difficulté de les valoriser sous forme de symbioses industrielles.

Les sections suivantes détaillent les 11 familles de flux présentant un potentiel. Leur analyse tient compte des caractéristiques des activités économiques sur les territoires concernés et n'a pas pour objectif de constituer une liste exhaustive des synergies existantes et réalisables pour l'ensemble des activités économiques du système industriel moderne.

Finalement, il convient d'ajouter une thématique qui s'applique à chacune des familles de flux précédentes : la mutualisation de services et d'infrastructures. S'agissant d'une solution particulière qui requiert une remise en cause du fonctionnement habituel de l'entreprise et nécessite un nouvel apprentissage organisationnel, ce cas est traité séparément à la Section 4.4.13.

Tableau 18 : Rappel des 18 familles de flux constituant la nomenclature des flux de matière et d'énergie et détaillées dans la Section 2.3.1. Les lignes grisées indiquent les familles de flux pour lesquelles aucune synergie potentielle n'a été détectée dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région.
Source : auteur.

N°	Famille de flux	Exemple de flux
1	Bois	Bois naturel, bois brut, bois traité
2	Boues	Boue d'épuration, boue de curage
3	Cellulose	Carton, papier, bagasse
4	Eau	Eau déminéralisée, eau souterraine, eau traitée
5	Encres et pigments	Pigment, encre, peinture, teinture
6	Gaz	Ammoniac, azote, hydrogène, oxygène
7	Huiles et graisses	Huile minérale, huile végétale, graisse
8	Macromolécules	Enzyme, protéine
9	Matériaux inertes	Sable, gravier, argile cuite, brique, tuile, verre
10	Matériaux électroniques, et informatiques	Câble électrique, ordinateur
11	Matières organiques	Matière organique végétale et animale
12	Métaux	Métal pur, composé métallique
13	Objets et substances fonctionnels	Adhésif, bouteille, chiffon, emballage, palette
14	Organismes vivants	Algue, bactérie, bétail, poisson
15	Plastiques et caoutchoucs	Blanchet d'imprimerie, résine plastique
16	Produits chimiques	Solvant, acide, base
17	Textiles et cuirs	Fibre animale, fibre synthétique
18	Vecteurs énergétiques et mécaniques	Air chaud, biogaz, charbon, électricité, méthane, vapeur

Le chapitre est structuré selon les éléments théoriques présentés ci-dessus. Premièrement, les 54 activités économiques dont les flux de matière et d'énergie ont été étudiés dans les études de cas de Genève (Section 4.2) et de Lausanne Région (Section 4.3) sont listées. Deuxièmement, les symbioses industrielles pré-existantes identifiées sont présentées pour chaque étude de cas. Troisièmement, la faisabilité et la pertinence des symbioses industrielles potentielles sont analysées (Sections 4.4.2 à 4.4.13). Finalement, un modèle d'écosystème industriel est proposé pour le contexte suisse (Section 4.5).

4.2 ETUDE DE CAS N°1 : GENEVE

Le tissu économique genevois est constitué de plus de 20'000 entreprises et organismes de droit public. Le secteur des services est l'employeur majoritaire avec 83% des emplois. Le groupe de travail Ecosite a souhaité cibler les principaux consommateurs de ressources du secteur secondaire. Il représente 4'300 entreprises et 16 % des emplois du canton (OCSTAT 2008). Comme détaillé dans les sections 1.6.3 et 2.6.1, plus de cent entreprises ont été contactées afin de détecter des symbioses industrielles pré-existantes et de motiver celles-ci à participer à la détection de nouvelles opportunités en réalisant un audit de leur chaîne de production.

Les principaux secteurs concernés sont : la construction⁴², l'horlogerie, la fabrication de machines et d'électronique, l'industrie agro-alimentaire, ainsi que les industries chimiques et pharmaceutiques. Certaines activités incontournables de toute agglomération urbaine ont également été étudiées : l'imprimerie, la collecte et le traitement des eaux et le commerce et la réparation d'automobiles. Pour tenir compte de la mixité du territoire genevois, certaines activités liées à l'agriculture, aux services de soutien aux entreprises et du domaine de la santé ont également été considérées.

Entre 2005 et 2009, trente-deux des entreprises contactées ont réalisé un audit de leur activité. La méthodologie d'audit utilisée pour les vingt premières était celle développée par Cyril Adoue pour la première utilisation du logiciel Presteo. Les suivantes ont utilisé la méthodologie développée dans le cadre de cette recherche et détaillée à la Section 2.3. La liste des entreprises étudiées est présentée dans le Tableau 19. La Figure 55 rend compte de leur position géographique et renseigne sur la position des zones industrielles dans le canton.

⁴² Elle regroupe l'extraction de matières premières, la fabrication de béton et de bitume, la menuiserie, le travail des métaux et toutes les activités nécessaires à la construction d'un bâtiment ou d'une infrastructure de génie civil

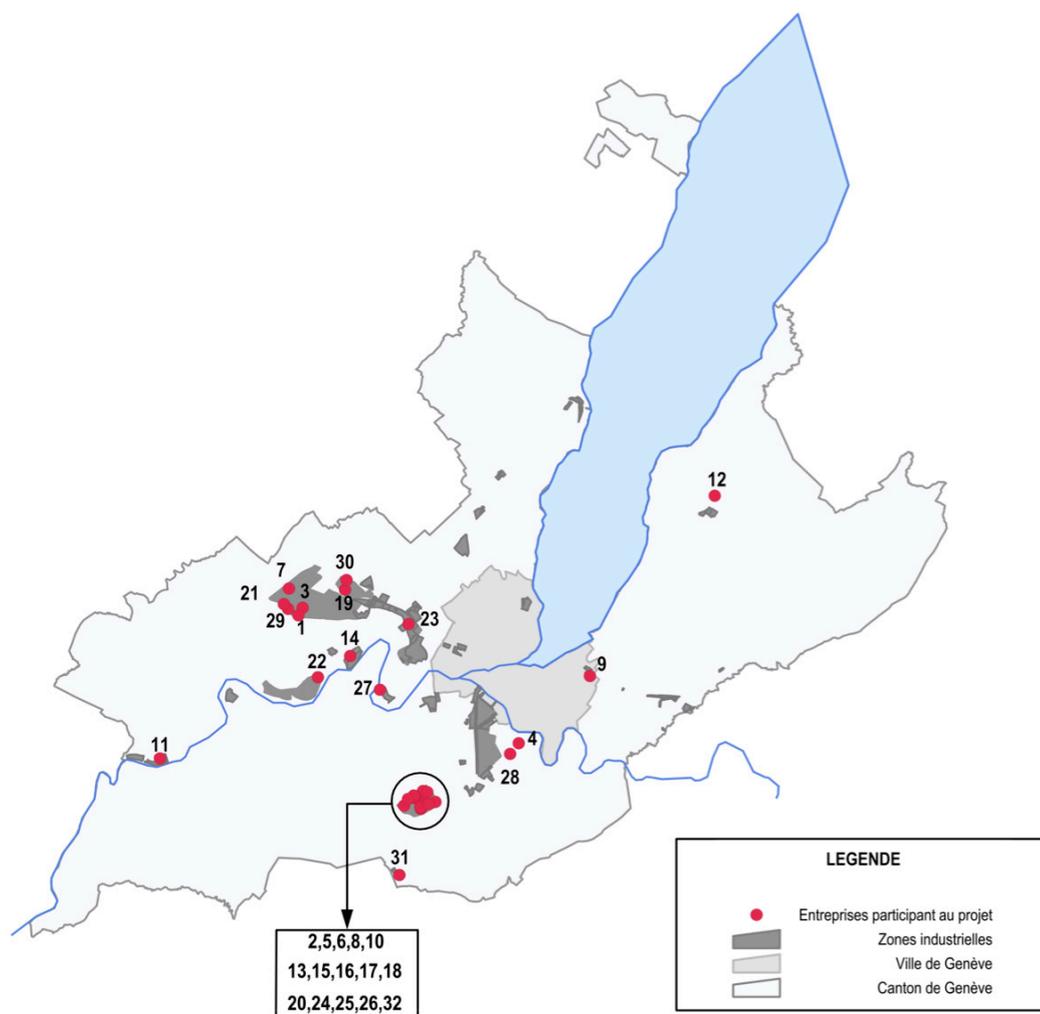


Figure 55 : Répartition des entités économiques contactées et ayant accepté de réaliser un audit de leur chaîne de production sur le territoire du Canton de Genève. Les chiffres correspondent aux entreprises présentées dans le Tableau 18. Source : auteur et groupe de travail Ecosite, 2010.

Tableau 19 : Liste des entreprises auditées dans le cadre du projet pilote de Genève en date du 31 janvier 2010. Source : auteur et groupe de travail Ecosite.

N°	Raison Sociale	Adresse localité	Code NOGA			Libellé branche économique
			Section	Division	Complet	
1	ABB Sécheron SA	1217 Meyrin	C	27	271100	Fabrication de moteurs, génératrices et transformateurs électriques
2	Addex Pharma SA	1228 Plan-les-Ouates	M	72	721900	Recherche dans le domaine pharmaceutique
3	Atar Roto Presse SA	1217 Meyrin	C	18	181201	Impression offset et rotatives
4	Barro et Cie SA	1227 Carouge GE	C	16	162301	Menuiserie du bâtiment, fenêtres et portes
5	Bevanar SA	1228 Plan-les-Ouates	G	46	463600	Commerce de gros de sucre, chocolat et confiserie
6	Bracco Research SA	1228 Plan-les-Ouates	M	72	721900	Recherche développement en autres sciences naturelles, ingénierie, sciences médicales et agricoles
7	Charmilles Technologies SA	1217 Meyrin	C	28	284100	Fabrication de machines de formage des métaux
8	CTN	1228 Plan-les-Ouates	N	82	-	Activités administratives et autres activités de soutien aux entreprises
9	Ercal SA	1208 Genève	C	31	310200	Fabrication de meubles de cuisine
10	Fiduciaire R. Pillet	1228 Plan-les-Ouates	M	69	692000	Activités comptables; fiduciaires
11	Firmenich SA	1227 Les Acacias	C	20	204200	Fabrication de parfums et de produits pour la toilette
12	Garage Jean Krucker SA	1222 Vézenaz	G	45	452001	Entretien et réparation de véhicules automobiles
13	Georges Constantin SA	1228 Plan-les-Ouates	F	43	432202	Installation d'équipements sanitaires et ferblanterie
14	Givaudan SA	1214 Vernier	C	20	205300	Fabrication d'huiles essentielles
15	Jean Gallay SA	1228 Plan-les-Ouates	C	25	256100	Traitement et revêtement des métaux
16	Jean Piasio SA	1228 Plan-les-Ouates	F	42	421100	Construction de routes et autoroutes
17	Laiteries Réunies SA	1228 Plan-les-Ouates	C	10	105101	Fabrication de produits laitiers frais
18	Liaisons Electroniques-Mécaniques LEM SA	1228 Plan-les-Ouates	C	27	279000	Fabrication d'autres matériels électriques
19	OM Pharma	1217 Meyrin	C	21	212000	Fabrication de préparations pharmaceutiques
20	Patek, Philippe SA	1228 Plan-les-Ouates	C	26	265201	Fabrication et assemblage de montres
21	Pouly Tradition SA	1217 Meyrin	G	47	472401	Commerce de détail de pain, de pâtisserie et de confiserie
22	Prelco Préfabrication d'Eléments de Construction SA	1242 Satigny	C	23	236100	Fabrication d'éléments en béton pour la construction
23	Pro Béton SA	1214 Vernier	C	23	236300	Fabrication de béton prêt à l'emploi
24	Publipartner SA	1215 Genève	M	73	731100	Activités des agences de publicité
25	Rolex SA	1228 Plan-les-Ouates	C	26	265201	Fabrication et assemblage de montres
26	Safe Host SA	1228 Plan-les-Ouates	J	58	582900	Édition d'autres logiciels
27	SIG-Services Industriels de Genève,	1219 Aire	E	36	360000	Captage, traitement et distribution d'eau
28	Similor Kugler SA	1227 Carouge GE	C	28	281400	Fabrication d'articles de robinetterie
29	Tecvia SA	1217 Meyrin	C	23	239901	Fabrication de produits à base d'asphalte
30	Tradall SA	1217 Meyrin	C	20	205300	Fabrication d'huiles essentielles
31	Tuileries & Briqueteries SA	1257 La Croix-de-Rozon	C	23	233200	Fabrication de briques, tuiles et produits de construction, en terre cuite
32	Vacheron Constantin	1228 Plan-les-Ouates	C	26	265201	Fabrication et assemblage de montres

4.2.1 Symbioses industrielles pré-existantes

Entre 2005 et 2010, plus de vingt symbioses industrielles pré-existantes impliquant des flux de matière différents ont été détectées à Genève. Certaines d'entre elles ne se situent pas strictement dans les limites du canton. Le territoire suisse étant petit et fortement fragmenté, plusieurs symbioses impliquent un ou plusieurs acteurs économiques situés en dehors du territoire cantonal. Ainsi, le territoire du canton de Genève apparaît déjà comme un écosystème industriel fortement développé. Il existe très probablement de nombreuses collaborations entre acteurs économiques, étant donné que seules environ 100 entités économiques et une dizaine de recycleurs ont été questionnés à ce sujet.

Le système de recyclage suisse est hautement évolué et diversifié. Ses acteurs recherchent constamment à améliorer leur offre et leur efficacité dans ce domaine très compétitif. Certaines filières de traitement des déchets dont les procédés et débouchés constituent une réutilisation existent, auquel cas les collecteurs de déchets servent d'intermédiaires. Le principe de réutilisation étant respecté, certaines de ces filières sont également présentées comme des symbioses pré-existantes dans les sections suivantes.

À l'heure actuelle, les secteurs d'activité ayant donné lieu aux échanges les plus prometteurs sont l'industrie chimique (NOGA division C20), pharmaceutique (NOGA division C21), la production de produits minéraux (NOGA division C23) et de génie civil (NOGA division F42), l'épuration des eaux (NOGA division E 37) et la fabrication de biens en général.

4.2.1.1 L'eau (n°4)

Aujourd'hui, plus de septante points de prélèvements permettent d'utiliser les eaux du Léman, du Rhône et de l'Arve. Trente-six d'entre eux sont destinés à l'arrosage des espaces verts et des jardins publics et privés, vingt-huit sont utilisés pour faire fonctionner les systèmes de climatisation des activités du tertiaire au centre ville et huit ont été réalisés pour des applications industrielles. S'il est parfois difficile de connaître l'utilisation exacte de l'eau, il s'agit d'autant de symbioses industrielles existantes à Genève qui permettent de substituer de l'eau potable par de l'eau de surface. Il ne s'agit pas toujours d'utilisations en cascade de l'eau (échange de co-produit) mais de substitution de la ressource par remplissant les mêmes conditions d'utilisation, mais en générant moins d'impacts sur l'environnement.

Les eaux de pluie sont également utilisées pour l'arrosage des espaces verts, en Ville de Genève et dans la commune de Meyrin, et pour le nettoyage des voies publiques dans la commune de Carouge.

D'autres symbioses industrielles impliquent les ressources d'eau souterraine. Huit puits de captage existent actuellement dans la nappe du Rhône. Tous sont exploités pour un usage hydrothermique dans les secteurs secondaire et tertiaire, également en substitution de l'eau potable.

Il existe également six points où la nappe phréatique superficielle a été mise au jour par les activités d'extraction de gravier. Dans les gravières, l'eau souterraine est utilisée pour le nettoyage des installations et des graves extraites, toujours en substitution de l'eau potable.

En tout, il existe actuellement à Genève au moins quarante-deux symbioses industrielles dans le domaine de l'eau (Figure 56). D'autres symbioses potentielles existent encore et sont discutés dans la Section 4.4.4.

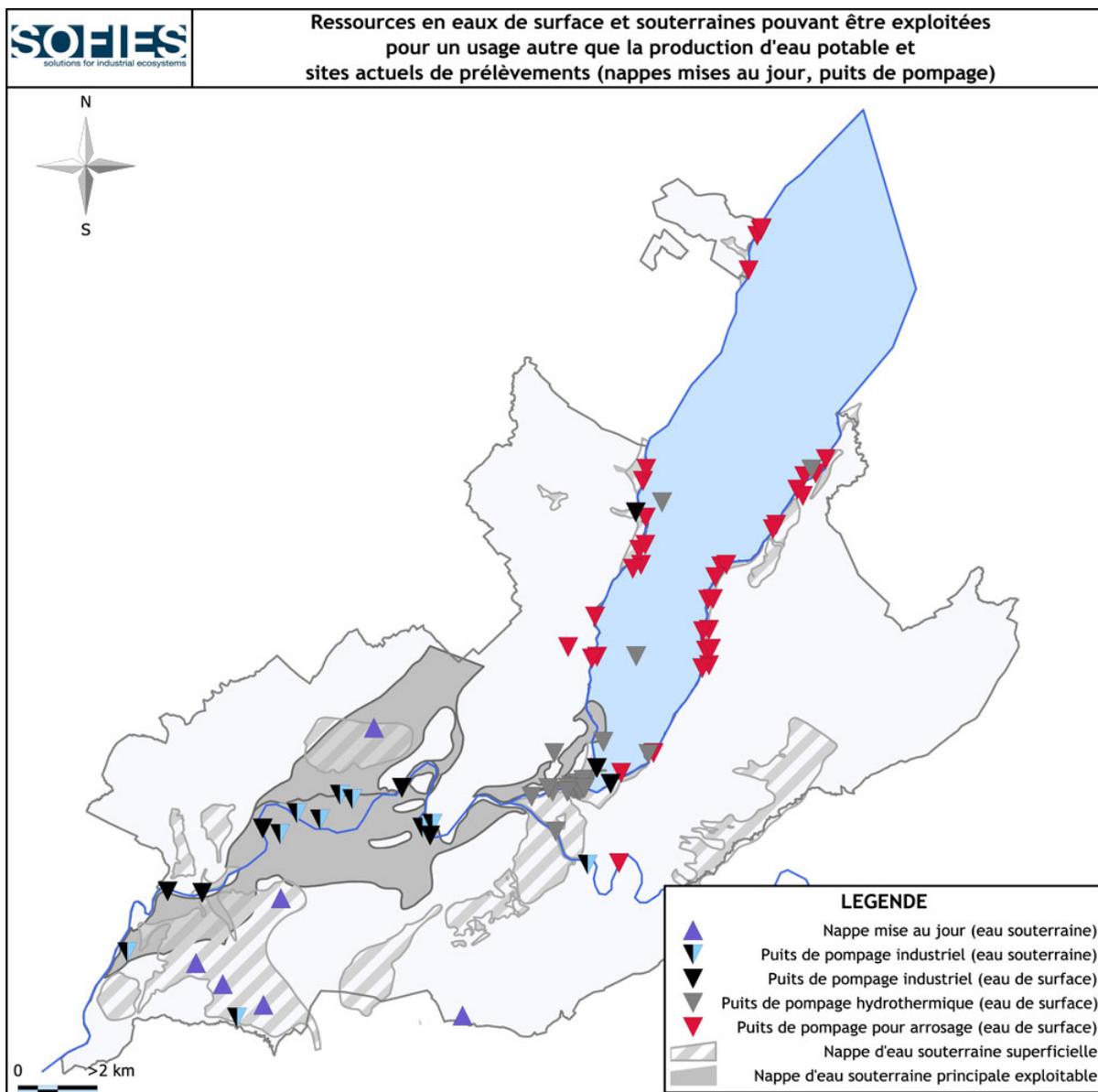


Figure 56 : Ressources en eaux de surface et souterraines pouvant être exploitées pour un usage autre que la production d'eau potable et sites actuels de prélèvement constituant des symbioses industrielles pré-existantes sous la forme d'une substitution de ressource. Source : (Carvalho et Massard 2010).

4.2.1.2 Les huiles et graisses (n°7)

La société Biocarb SA récupère les huiles végétales usées pour fabriquer du biocarburant. Cette symbiose pré-existante permet de valoriser les huiles végétales usagées par l'intermédiaire d'un

processus d'estérification produisant un carburant de substitution ainsi qu'un co-produit de glycérol valorisable dans l'industrie des cosmétiques. Cette solution a l'avantage d'exploiter les possibilités d'utilisation des combustibles liquides dans le domaine des transports et de fournir une alternative à l'utilisation des carburants pétroliers pour l'automobile. Cette filière est en compétition avec la valorisation énergétique en cimenterie des huiles et graisses (Section 4.3.1).

4.2.1.3 *Les matériaux inertes (n°9)*

L'étude du métabolisme du canton de Genève, réalisée à partir des données de l'année 2000, identifiait le secteur de la construction comme le principal consommateur de ressources du canton (Faist, Frischknecht et al. 2003). Ce secteur d'activité applique depuis plusieurs années les principes des symbioses industrielles. Plusieurs expériences ont été identifiées à Genève :

- L'entreprise Tecvia SA est spécialisée dans la fabrication de liants bitumineux pour les voies de communication. Elle récupère les fraisats d'enrobés bitumineux issus des chantiers de travaux publics pour fabriquer de nouveaux matériaux. Une telle collaboration existe par exemple avec l'entreprise Jean Piasio SA (NOGA division F42). Un premier processus, l'enrobé à chaud, permet une réutilisation de matériaux recyclés jusqu'à 60%. Un second processus de production d'enrobé bitumineux à froid, appelé Valorcol, utilise 100% de matériaux recyclés. Par ces deux techniques, Tecvia évite chaque année la mise en décharge d'environ 30'000 tonnes de produits issus de la rénovation des routes.
- L'entreprise Prelco SA, spécialisée dans la production d'éléments en béton, valorise des blocs de béton de 0.65 m³ issus de la surproduction de béton. Le béton est conditionné sur place en blocs de grande taille qui sont valorisés à l'intérieur du canton de Genève et dans le reste de la Suisse comme corps morts pour les ports et pour des usages militaires. Cette symbiose concerne plusieurs dizaines de tonnes de béton par an. Elle évite ainsi la production de blocs spécialement pour cette utilisation et, par conséquent, la mise au rebut des résidus de production. Prelco SA utilise également du sable pour un processus de sablage à air comprimé pour le traitement de surfaces en béton. Le sable est ensuite réutilisé pour des aménagements extérieurs, par l'intermédiaire d'une carrière au pied du Salève (NOGA division B8), qui s'occupe de son nettoyage et de sa préparation. En particulier, une grande partie est réutilisée sur des pistes d'équitation dans un manège. Cette symbiose permet la valorisation de 1'400 m³/an de sable et d'éviter ainsi sa mise en décharge pour matériaux inertes.

Les déchets d'argile cuite produits par la société Tuilerie et Briqueterie SA, spécialiste de la fabrication de tuiles, sont également réutilisés dans la construction, principalement pour réaliser des aménagements extérieurs.

De manière générale, les matériaux inertes présentent un fort potentiel de réutilisation car certains d'entre eux peuvent être utilisés pour produire de nouveaux matériaux. L'administration cantonale tente depuis

plusieurs années de favoriser un usage optimal des ressources à travers la mise en place de nouvelles filières de réutilisation pour l'ensemble des matériaux de démolition et de construction. Une politique incitative est menée par l'intermédiaire du groupe de travail Ecomat^{GE}. Plusieurs plateformes de valorisation des déchets de démolition et de construction sont en train de voir le jour à Genève qui permettent de produire du béton à base d'un mélange de matériaux recyclés contenant des graviers, des briques et des tuiles.

4.2.1.4 *Les matières organiques (n°11)*

La Confédération suisse a publié en 2009 une stratégie pour optimiser la valorisation des déchets de biomasse et de l'industrie agro-alimentaire. Suivant les principes de l'écologie industrielle et les objectifs stratégiques de la Confédération, la préférence est donnée à l'utilisation pour la nutrition humaine puis dans les activités liées à l'agriculture, comme la production d'engrais, et à l'engraissement animal.

A Genève, l'association Partage a créé une mutualisation de collecte et de redistribution sous la forme d'une banque alimentaire permettant la redistribution des invendus alimentaires propres à la consommation. Plus de 1000 tonnes fournies par les grands distributeurs ont ainsi été distribuées en 2009. Leur collecte est réalisée grâce à 10 vélos et 15 triporteurs électriques.

L'entreprise Laiteries Réunies SA, active dans le secteur de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) et située à Plan-les-Ouates, valorise son lactosérum, issu de la production de produits laitiers, pour l'engraissement porcin à Genève et de veaux en Suisse alémanique. Cette solution permet de nourrir des élevages locaux, réduisant les importations de nourriture et de viande. Elle produit chaque année de grandes quantités de lactosérum doux et acide. Le sérum doux (1'080 m³/an en 2007) est utilisé pour l'engraissement de veaux dans le canton de Lucerne, une telle activité n'existant pas à Genève (NOGA division A1). Le sérum acide (1'200 m³/an en 2007) sert à l'engraissement de porcs dans le canton de Genève (NOGA division A1). Le surplus subsistant pour ces deux flux est pris en charge par l'entreprise Translait, basée à Chésopelloz dans le canton de Fribourg et expédié à l'étranger pour servir également à l'alimentation animale. Cependant, depuis l'automne 2007, le procédé dont est issu le lactosérum doux a été arrêté à cause d'une modification dans la liste des produits fabriqués. Seule la symbiose concernant le lactosérum acide subsiste aujourd'hui.

Les matières premières secondaires issues des activités de l'agriculture sont également réutilisées pour la production de biogaz et de compost dans l'installation du Nant de Chatillon. Les résidus de digestion de la méthanisation sont mélangés à d'autres déchets de biomasse issus des parcs et jardins pour produire du compost. Si ce système peut encore être optimisé, il représente un très bon exemple de valorisation efficace de la ressource biomasse grâce à la production conjointe de biogaz et de compost utilisé par les exploitations agricoles du canton.

Finalement, l'entreprise Tradall SA, spécialisée dans la production de boissons alcooliques distillées (NOGA division C10), dispose de grandes quantités d'herbes aromatiques séchées, un co-produit issus

de l'extraction de saveurs. Depuis 2007, plus de 200 tonnes par an, conditionnées en briquettes de 10 cm par 10 cm ont été détournées de la valorisation énergétique pour être utilisées comme litière pour bovins et comme amendement organique (NOGA division A1). L'entité économique a été informée des possibilités de valorisation dans le cadre des actions du groupe de travail Ecosite. Les modalités de mise en œuvre de la symbiose ont été discutées directement entre les deux acteurs, avec l'aide d'AgriGenève, association faitière de l'agriculture genevoise, et l'autorisation a été délivrée par le service de géologie, sols et déchets (GESDEC). Il s'agit d'une nouvelle symbiose mise en œuvre grâce à l'action du coordinateur de terrain dans le cadre de ce projet.

4.2.1.5 *Les objets et substances fonctionnelles (n°13)*

Le mobilier, les habits et le matériel de bureau courant font l'objet d'une collecte particulière destinée à la réparation et à la revente. L'association Emmaüs récupère depuis des décennies les objets d'usage courant dont les particuliers et les entreprises souhaitent se défaire. Elle les met ensuite en vente dans ses magasins. Une autre association, Réalise, récupère également plusieurs types de biens, comme les ordinateurs et les téléphones portables afin de les remettre sur le marché en Suisse ou à l'étranger.

Il s'agit du premier maillon de la réutilisation d'objets. Il consiste à donner une deuxième vie à des biens de consommation encore utilisables. Ces activités, également exercées par les organisations Caritas et CSP, ont une dimension sociale indéniable à Genève. S'il ne s'agit pas à proprement parler de symbioses industrielles, ces objets sont réutilisés par l'intermédiaire d'un tiers opérateur qui les remet en vente. Ces pratiques constituent néanmoins des solutions très efficaces pour éviter la mise au rebut de biens encore utilisables.

D'autres bonnes pratiques existent dans le domaine des matériaux de conditionnement. Les palettes en bois sont encore souvent mises au rebut après un petit nombre d'utilisations. Il existe en Suisse romande des entités dont l'activité consiste à récupérer, à réparer, puis à revendre les palettes, prolongeant ainsi leur durée de vie. Les entreprises Swisspalettes et Ecocube dans le canton de Vaud pratiquent cette activité avec succès depuis plusieurs années. Cette solution, impliquant un intermédiaire, constitue une alternative plus efficace en ce qui concerne les impacts environnementaux, que la valorisation énergétique du bois, qui pourrait dans certains cas être présentée comme une symbiose industrielle.

4.2.1.6 *Les produits chimiques (n°16)*

Le groupe de travail Ecosite recherche depuis 2006 des potentiels de réutilisation de plusieurs acides utilisés par les industries chimique (NOGA division C20), pharmaceutique (NOGA division C21) et alimentaire (NOGA division C10). Ces secteurs d'activité ont compris depuis plusieurs années les avantages économiques de la réutilisation de substances chimiques. Les nouveaux procédés de production permettent d'ailleurs de réutiliser plusieurs fois certains produits, réduisant, sans toutefois la

supprimer, la production de déchets spéciaux. Certaines entreprises ont également développé des échanges de sous-produits :

- L'entreprise Firmenich SA participe à plusieurs échanges de produits chimiques. Actuellement, l'acide phosphorique usagé est réutilisé pour le traitement des eaux (STEP) dans le canton de Bâle. Jusqu'en 2008, le sous-produit était revendu à une autre entité économique suisse pour être valorisé comme nutriment pour bactérie dans une installation de traitement d'effluents industriels (Stucki 2007). Le site de production de la Plaine, à Genève, utilise également de l'acide sulfurique en provenance de Suisse alémanique pour traiter ses eaux usées. Il est utilisé comme nutriment pour bactéries dans les installations de traitement des eaux issues de la production de papier (NOGA division C 17). Cette symbiose permet la réutilisation d'environ 300 tonnes par an d'acide sulfurique (Stucki 2007). Le flux est conditionné en citerne et transporté en camion jusqu'à l'entité utilisatrice.

L'entreprise valorise également certains solvants usagés comme combustible de substitution en cimenterie. Si cette solution constitue une symbiose intéressante, des études sont en cours pour étudier les possibilités de réutilisation des solvants, qui constituent une solution environnementalement plus efficace que la valorisation énergétique.

- La société Givaudan SA intègre elle aussi les concepts de l'écologie industrielle à sa gestion des déchets. En particulier, de l'eau usée contenant des phosphates qui ne peuvent être traités dans la STEP de l'entreprise est depuis 2009 réutilisée dans une installation de traitement des eaux en Suisse alémanique à la place de produits chimiques neufs. La valorisation de ces eaux, auparavant incinérées, s'est avérée être une solution gagnant-gagnant pour Givaudan et la STEP.

Dans deux des cas précédents, les distances parcourues par les produits chimiques sont de l'ordre de plusieurs centaines de kilomètres alors que des installations similaires, pouvant potentiellement réutiliser ces mêmes flux, sont également présentes à Genève. Cette situation montre bien l'influence de la personne qui a coordonné leur mise en œuvre. Dans le cas présent, il s'agit d'un consultant très actif dans le secteur de la chimie en Suisse allemande.

4.2.1.7 Les vecteurs énergétiques et mécaniques (n°18)

Il existe actuellement presque trente installations le long de la partie urbaine du Rhône utilisant le pouvoir thermique de ce dernier pour des besoins de climatisation (Figure 56). Elles permettent une économie d'énergie conséquente pour les entreprises concernées.

Le projet Genève – Lac – Nations va encore plus loin. Il s'agit d'un excellent exemple de mutualisation d'approvisionnement entre plusieurs entités économiques des secteurs secondaire et tertiaire. Il fournit aux entreprises et aux organisations internationales du quartier des Nations de la chaleur (en hiver) et du froid (en été) en exploitant le potentiel thermique du lac. Plusieurs entités économiques du quartier de

Sécheron à Genève ont, sous l'impulsion du ScanE, accepté de se connecter à un réseau de distribution leur apportant de la chaleur en hiver et du froid en été. Le réseau distribue également de l'eau de qualité non potable pour l'arrosage public. Ce système de production mutualisée d'énergie utilise comme source d'énergie le lac Léman tout proche. En hiver, l'utilisation de pompes à chaleur permet d'extraire la chaleur contenue dans l'eau du lac pour produire un flux de chaleur de qualité suffisante pour le chauffage de surfaces de bureau. En été, l'eau du lac circule simplement dans la tuyauterie, refroidissant ainsi l'espace environnant.

Ce projet, le premier du genre réalisé à Genève, illustre de manière exemplaire la création d'un réseau impliquant plusieurs acteurs économiques des secteurs secondaire et tertiaire. L'Etat de Genève a servi de déclencheur et facilité sa réalisation en investissant pour la construction des installations avant de les revendre aux utilisateurs. La réalisation d'un projet similaire est en cours au centre ville de Versoix.

Le réseau de chauffage à distance Cadiom qui fournit en vapeur de nombreux ménages et entreprises sur la rive gauche du Rhône est également un très bon exemple de mutualisation d'approvisionnement en chaleur. Le réseau valorise les rejets thermiques de l'incinérateur d'ordures ménagères (UIOM) des Cheneviers. Une entreprise raccordée n'a ainsi plus besoin de posséder sa propre chaudière, ce qui diminue le nombre de petites infrastructures sur le territoire et rend l'approvisionnement plus efficace. Une installation centralisée et gérée par du personnel expérimenté a en effet de manière générale une efficacité supérieure à plusieurs petites installations. Cette installation possède cependant encore un potentiel de développement et d'optimisation important. Cette mutualisation est cependant basée sur la valorisation énergétique de déchets des ménages, ce qui ne constitue pas une solution optimale car certains des flux de déchets incinérés pourraient être recyclés.

Autre exemple, la cimenterie d'Eclépens (NOGA division C23), située sur le territoire du canton de Vaud fonctionne certains mois uniquement grâce à la combustion de sous-produits (essentiellement des déchets spéciaux comme des produits chimiques, des huiles et des graisses) issus des entités économiques des cantons de Genève et Vaud. Cette filière d'approvisionnement est décrite en détail dans la Section 4.3.1.

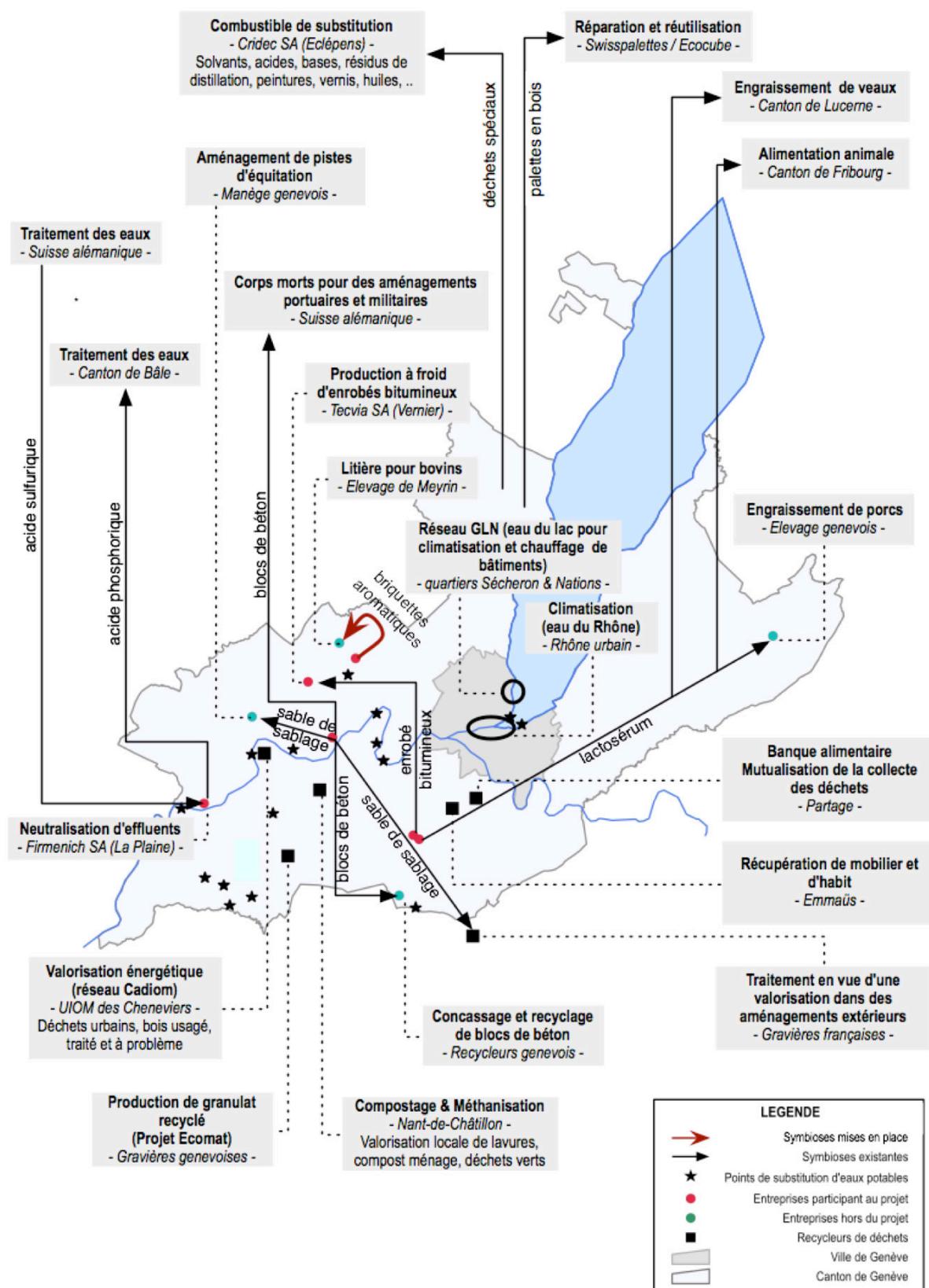


Figure 57 : Symbioses industrielles pré-existantes et mises en place entre 2006 et 2010 à Genève.

Source : auteur et groupe de travail Ecosite, 2010.

4.2.2 Symbioses industrielles potentielles

La Figure 58 représente l'ensemble des symbioses industrielles potentielles détectées entre 2006 et 2010 entre les 32 entreprises ayant réalisé un audit de leur chaîne de production. Afin de généraliser les résultats obtenus, les entreprises sont caractérisées par leur code NOGA (section et division). 29 synergies potentielles ont été détectées. Elles font l'objet d'une analyse de faisabilité et de pertinence à la Section 4.4. La généralisation par code NOGA a pour effet que certaines des synergies mentionnées à la Figure 58 ne sont pas directement réalisables entre les 32 entreprises impliquées dans le projet pilote de Genève. Elles constituent néanmoins en principe des pistes intéressantes pour un usage efficace des ressources sur le territoire considéré.

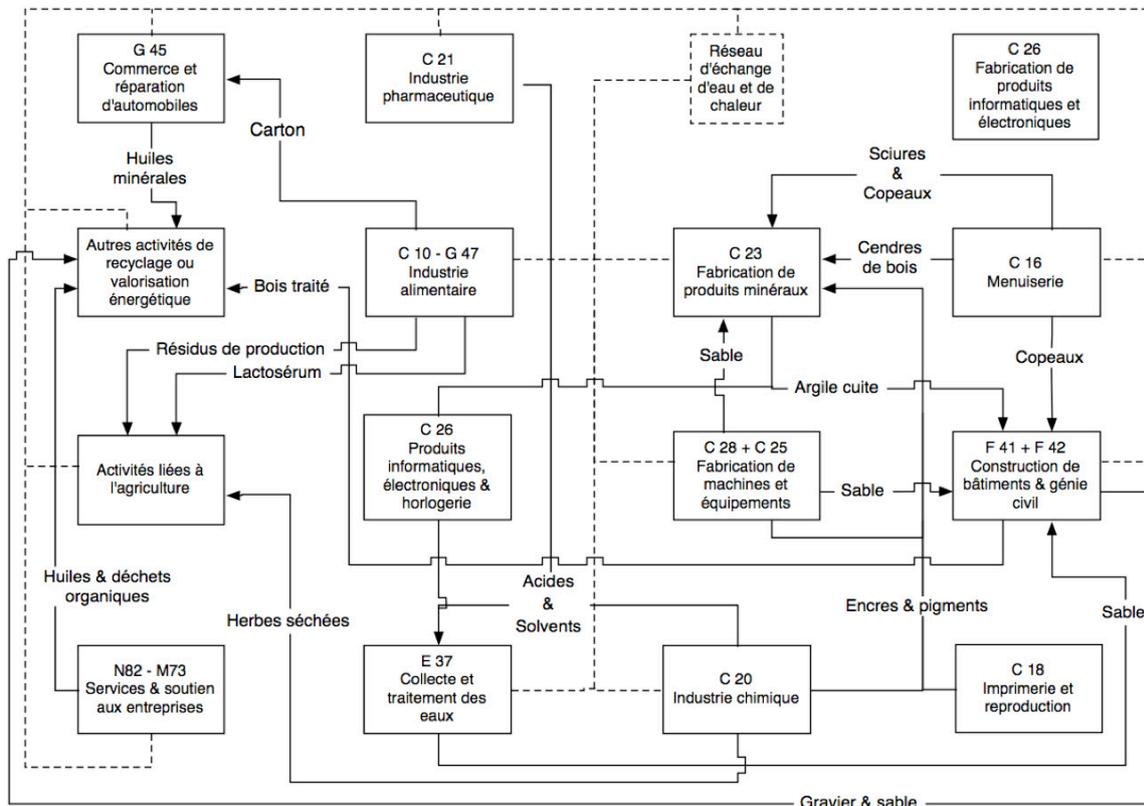


Figure 58 : Symbioses industrielles potentielles identifiées entre 2006 et 2010 par le projet pilote du groupe de travail Ecosite et qui fait l'objet d'une étude de cas dans cette thèse. Source : auteur.

4.3 ETUDE DE CAS N°2 : LAUSANNE REGION

Les limites géographiques de la deuxième étude de cas ne correspondent pas à des limites cantonales. Etudier l'ensemble de canton de Vaud nous est apparu en 2007 comme trop ambitieux. Le périmètre, plus petit, retenu est celui de Lausanne Région, un groupement de vingt-six communes qui constitue une entité locale de promotion économique (Figure 59). Cet espace géographique contient une forte densité d'activités économiques et inclut la ville de Lausanne. Il est divisé en trois régions : l'Ouest, l'Est et le Nord lausannois. Huit entreprises situées hors périmètre d'étude, mais relativement peu éloignées, ont été intégrées au projet car elles présentent des caractéristiques particulièrement intéressantes.

Dans le cadre du projet de master de Baptiste Antille, quarante-trois entreprises ont été contactées (Antille 2007). Vingt et une entités économiques ont montré un intérêt pour le projet et ont accepté de réaliser un audit de leur activité de production selon une méthodologie proche de celle décrite dans la Section 2.3 (Tableau 20). La Figure 59 montre leur répartition géographique sur le territoire de Lausanne Région (six se situent à l'extérieur de celui-ci). Les numéros présentés dans la figure ne correspondent cependant pas aux numéros proposés dans le Tableau 20 et utilisé pour la présentation des entreprises de ce projet pilote.

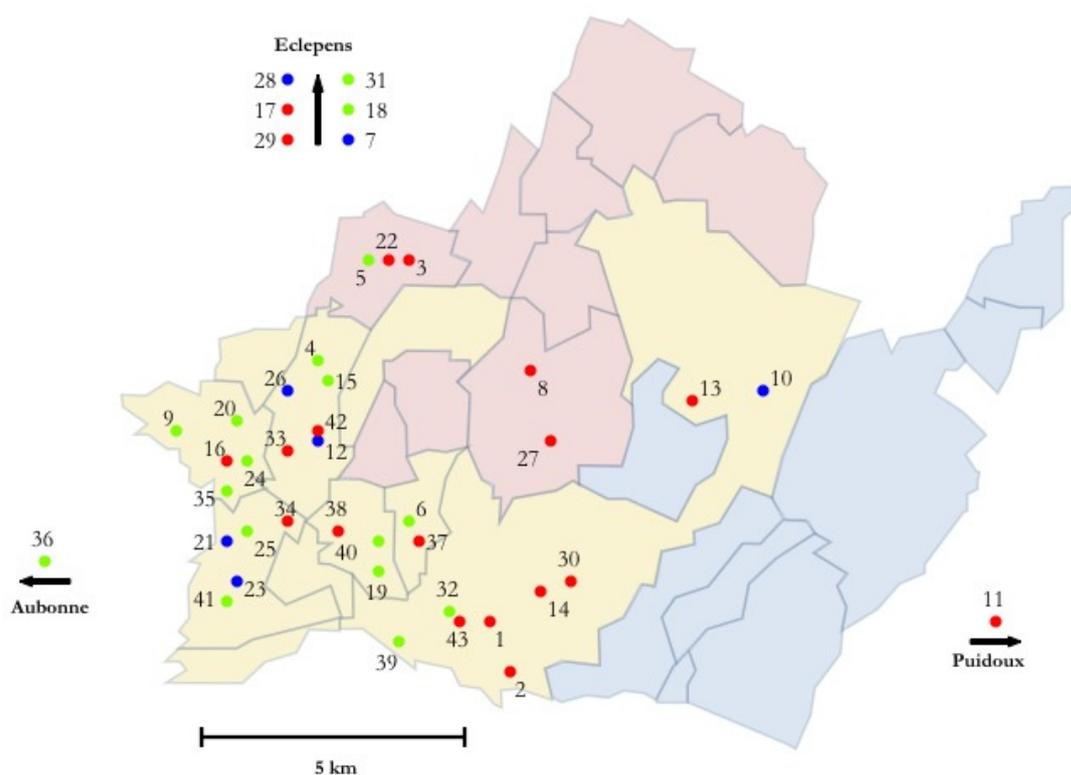


Figure 59 : Répartition des entités économiques contactées et ayant accepté de réaliser un audit de leur chaîne de production sur le territoire de Lausanne Région. Source : (Antille 2007).

Tableau 20 : Liste des entreprises auditées dans le cadre du projet pilote de Lausanne Région en juillet 2008. Source : auteur et (Antille 2007).

N°	Raison Sociale 1	Adresse localité	NOGA			Libellé branche économique
			Section	Division	Complet	
33	B. Braun Médical SA	1023 Crissier	C	21	212000	Industrie pharmaceutique
35	Bell SA	1033 Cheseaux-sur-Lausanne	C	10	101100	Industrie alimentaire
36	Bobst SA	1008 Prilly	C	28	289500	Fabrication de machines et équipements n.c.a.
37	Brown & Sharpe Tesa SA	1020 Renens	C	26	265100	Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques
38	Centre d'impression Edipresse Lausanne SA	1030 Bussigny-près-Lausanne	C	18	181100	Imprimerie et reproduction d'enregistrements
39	CHUV	1011 Lausanne	Q	86		Activité pour la santé humaine
40	Garage Emil Frey	1806 St-Légier-La Chiésaz	G	45	-	Commerce et réparation d'automobiles et de motocycles
41	Holcim Béton frais + pompage SA	1030 Bussigny-près-Lausanne	C	23	236300	Fabrication d'autres produits minéraux non métalliques
42	Holcim Granulats & Bétons SA	1315 La Sarraz	B	8	81200	Autres industries extractives
43	Imprimerie Réunies Lausanne	1020 Renens	C	18	181201	Imprimerie et reproduction d'enregistrements
44	Jallut SA	1030 Bussigny-près-Lausanne	C	20	203000	Industrie chimique
45	Jowa SA	1024 Ecublens VD	C	10	107100	Industrie alimentaire
46	Lemo SA	1024 Ecublens VD	C	26	261100	Fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques
47	Losinger Construction SA	1030 Bussigny-près-Lausanne	F	41	412001	Construction de bâtiments
48	Maillefer SA	1024 Ecublens VD	C	28	284900	Fabrication de machines et équipements n.c.a.
49	Nexans Suisse SA	1305 Penthalaz	C	25	259900	Fabrication de produits métalliques, à l'exception des machines et des équipements
50	Provimi Kliba SA	1305 Penthalaz	C	10	106100	Industrie alimentaire
51	Ramelet SA	1007 Lausanne	C	25	251100	Fabrication de produits métalliques, à l'exception des machines et des équipements
52	Scheuchzer SA	1030 Bussigny-près-Lausanne	F	42	421200	Génie civil
53	Serono SA	1170 Aubonne	C	21	212000	Industrie pharmaceutique
54	STEP de Vidy	1007 Lausanne	E	37	370000	Collecte et traitement des eaux usées

4.3.1 Symbioses industrielles pré-existantes

Une seule symbiose industrielle pré-existante a été détectée sur le territoire de Lausanne Région – du moins les entreprises contactées ne nous ont pas fait part d'autres réalisations de ce type.

4.3.1.1 Vecteurs énergétiques et mécaniques (n°18)

La cimenterie d'Eclépens, située sur le territoire du canton de Vaud, fonctionne certains mois uniquement grâce à la combustion de déchets spéciaux issus essentiellement des entités économiques des cantons de Genève et Vaud. La cimenterie possède un contrat avec l'entreprise Cridec, sa voisine, qui lui prépare ces sous-produits sous forme de mélange à haut pouvoir calorifique.

Ces activités sont régies par la directive sur l'élimination des déchets dans les cimenteries édictée par l'Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP 2005) et l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005). La liste des déchets spéciaux autorisés est conséquente : solvants usés non halogénés, bains de fixation et de développement (activités de développement de photographies), huiles de moteur usées, produits chimiques mélangés, résidus de réactions chimiques, boues issues du traitement des eaux, de l'assainissement des sols, de drainage et du nettoyage des routes, pneus usagés, déchets de construction mélangés et de minéraux naturels, sables de fonderie et matériaux réfractaires, terres et gravats pollués, ainsi que tous les déchets prémélangés contenant au moins un type de déchets spéciaux. La Figure 60 représente les flux de déchets spéciaux spécifiquement identifiés par le projet pilote de Lausanne Région.

Cridec SA sert ainsi d'intermédiaire et dispose d'installations de transformation et de conditionnement. Elle transforme les déchets spéciaux en combustible solide de substitution composé d'un support carboné (sciure de bois) auquel sont ajoutées les matières liquides et les matières solides déchetées. A l'heure actuelle, la sciure de bois provient de scieries conventionnelles (sciure de coupe) avec une granulométrie définie (<10mm) et une hygrométrie d'environ 30 à 40 %. Le pouvoir énergétique du mélange obtenu est inférieur à celui du charbon mais suffisant pour le substituer aux combustibles fossiles. Cette filière s'apparente à une valorisation énergétique.

Il faut relever que les incinérateurs pour déchets spéciaux récents, comme celui de Valorec à Bâle, disposent de systèmes efficaces de récupération de la chaleur (production d'électricité et de vapeur), ainsi que d'installations performantes pour le traitement des fumées. A contrario, l'incinération en cimenterie ne dispose pas toujours de moyens d'épuration des fumées aussi efficaces. Néanmoins, dans le but d'assurer une combustion efficace et de respecter les limites imposées par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair 1985), les cimentiers mélangent leurs intrants (déchets spéciaux) à un support solide (sciure de bois) pour en faire un combustible incinérable dans leurs fours. Même si cette pratique qui s'apparente à

du sous-cyclage est largement connue et tolérée dans la pratique, elle n'est en principe pas admise par la Loi de protection de l'environnement (LPE 1983).

Étant donné la quantité nécessaire et la finalité de la sciure utilisée, les catégories de déchets « bois usagé » (actuellement valorisé dans l'installation de SIT-Mortara, en Italie) et « bois à problème » (actuellement incinéré en UIOM) pourraient se substituer à la matière première de sciure de bois naturel utilisée. Leur utilisation en cimenterie devrait faire l'objet d'une étude de faisabilité car la teneur en métaux lourds peut toutefois constituer une contrainte et l'hygrométrie nécessiter un ajustement selon les types de bois. Moyennant un broyage préalable, l'utilisation de la sciure de bois à problème pour ce combustible de cimenterie permettrait de substituer une quantité de sciure noble non négligeable. Celle-ci pourrait être utilisée pour la valorisation matière en tant que matériau de construction en Suisse romande ou pour la production de pellets pour chaudière individuelle. Cette substitution pourrait également permettre de diminuer les charges de Cridec SA, la valeur du bois naturel étant plus élevée que celle du bois usagé et du bois à problème, ce qui représente un avantage non négligeable dans un contexte d'augmentation du coût des ressources renouvelables comme la sciure de bois naturel.

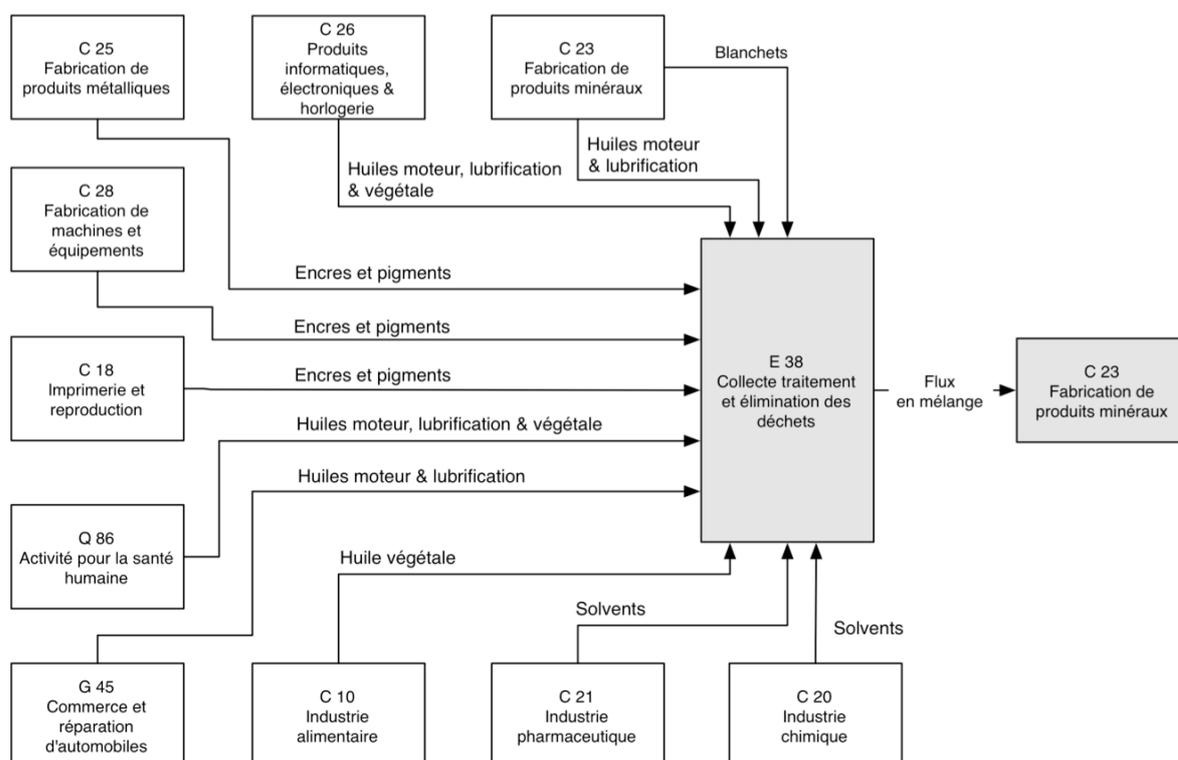


Figure 60 : Flux de déchets spéciaux identifiés en 2007 par le projet pilote de Lausanne Région et destinés à la production de combustible de substitution. Source : auteur.

4.3.2 Symbioses industrielles potentielles

Entre 2006 et 2008, 11 possibilités de nouvelles symbioses industrielles ont été détectées (Figure 61). Sur les 11 flux concernés, trois sont en réalité des potentiels de valorisation énergétique et deux impliquent des collaborations avec des activités liées à l'agriculture. Les détails concernant ces opportunités ainsi que l'analyse de leur faisabilité et de leur pertinence sont présentés dans la Section 4.4.

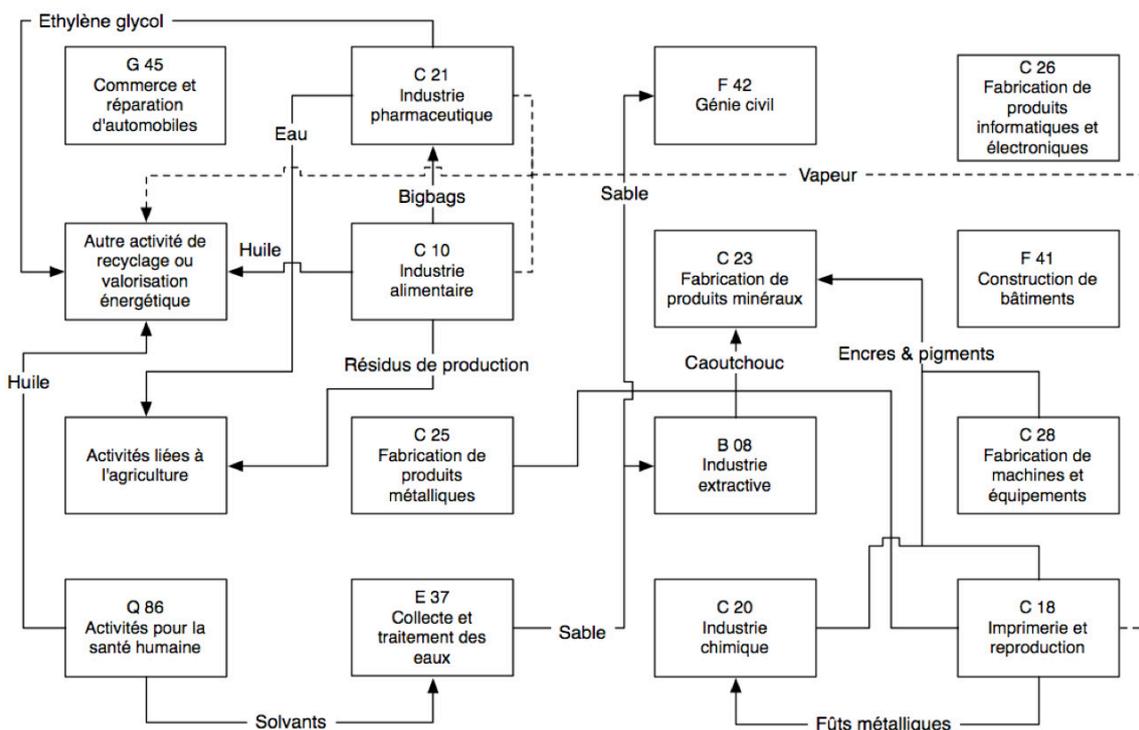


Figure 61 : Symbioses industrielles potentielles identifiées entre 2006 et 2008 par le projet pilote de Lausanne Région et qui fait l'objet d'une étude de cas dans cette thèse. Source : auteur.

4.4 ANALYSE DE LA FAISABILITE ET DE LA PERTINENCE DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES

Dans le Chapitre 2, nous avons mentionné les travaux ébauchés pour créer un système d'indicateurs permettant de noter et de classer les symbioses industrielles potentielles. Le système développé n'ayant pas abouti, il a été décidé de le présenter en annexe et non dans le corps de la recherche. Les éléments présentés dans ce chapitre sont basés sur le contexte légal, structurel et politique de la Suisse mais ne constituent pas un développement d'indicateurs à proprement parler. Lors des recherches sur les symbioses industrielles potentielles par famille de flux (Chapitre 4), cette ébauche de référentiel a néanmoins été utilisée pour classifier les pistes de synergies et détailler leur faisabilité. Ces résultats sont présentés dans l'Annexe 2.

Cette section propose premièrement une description des indicateurs disponibles en Suisse et dans le monde en lien avec la problématique environnementale afin de pouvoir, le cas échéant, poursuivre les recherches dans ce sens. Deuxièmement, elle détaille l'application des paramètres de faisabilité et de pertinence développés dans la Section 2.4 (Figure 62) aux symbioses industrielles potentielles détectées dans le cadre des projets pilotes de Genève (Section 4.2.2) et de Lausanne Région (Section 4.3.2). Les sections suivantes traitent des onze familles de flux décrites dans la Section 4.1.

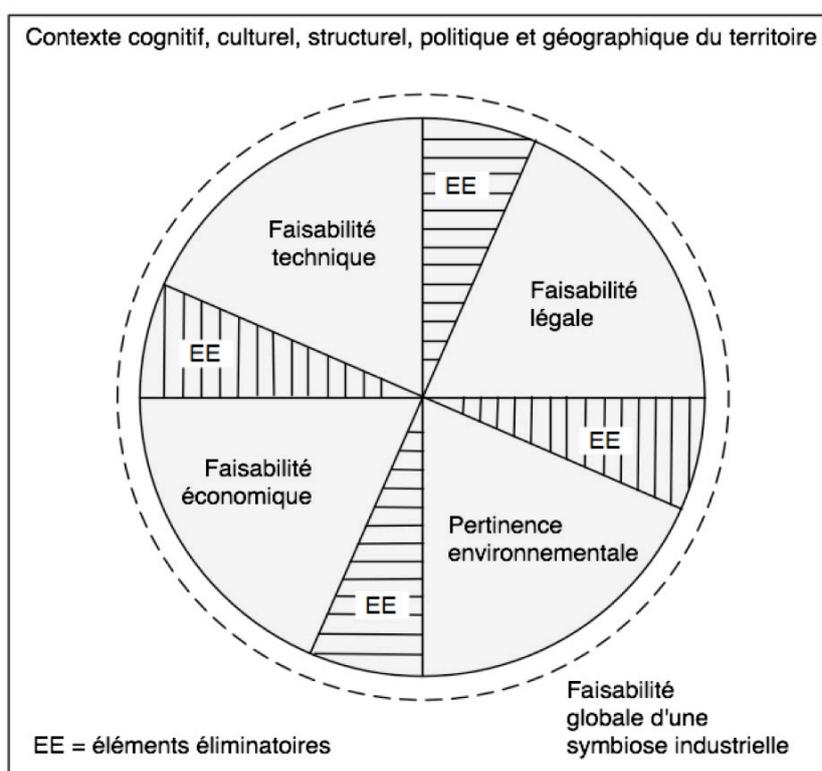


Figure 62 : Paramètres de faisabilité et de pertinence influençant la faisabilité globale des symbioses industrielles. Source : auteur, selon Figure 32, Section 2.4.

4.4.1 Les indicateurs dans le domaine de l'environnement et du développement durable

Le recours aux indicateurs est de plus en plus demandé par les parties en présence lors des études de faisabilité effectuées préalablement à tout projet à composante environnementale. Il existe beaucoup de termes différents pour désigner un indicateur : signe, symptôme, signal, présage, grade, rang, donnée, instrument, par exemple. Un indicateur est une partie des flux d'information nécessaires pour comprendre le monde, prendre une décision et planifier une action. Ainsi, les indicateurs proviennent de valeurs que nous avons intérêt à mesurer et ont pour objectif de créer une valeur ajoutée pour leur compréhension. Ces valeurs, quantitatives ou qualitatives, peuvent être géographiquement et culturellement spécifiques à une région du monde ou communes à l'ensemble de la planète (Meadows 1998). Un indicateur est donc un élément clé dans tout processus de décision. Dans la phase de lancement d'un projet, la prise de décision est basée sur l'écart entre un objectif à atteindre et la perception d'un système existant à un instant défini. Le but d'un indicateur est d'évaluer cette différence, ce qui en fait un élément important mais dangereux, car il peut faire évoluer un système de manière positive, mais également négative s'il est mal construit et mal utilisé.

Dans le domaine de l'environnement, toute prise de décision devrait reposer sur des bases analytiques rigoureuses. Or, dans la plupart des domaines clés de l'environnement, les données à disposition pour comprendre le système manquent aujourd'hui encore ou sont incomplètes. Un indicateur environnemental a donc le double objectif de combler ces manques mais également d'attirer l'attention sur la nécessité de posséder des données de qualité. Le *Environmental Performance Index* (EPI), développé par l'Université de Yale, est un système d'indicateurs dont l'objectif est de réduire les risques sur la santé humaine et de favoriser un bon usage des ressources. Le rapport 2008 de l'EPI conclut en insistant sur le fait que les décisions dans le domaine environnemental doivent et peuvent être basées sur des données pertinentes et faites de manière plus rigoureuse (Esty, Levy et al. 2008). En effet, la problématique environnementale fait face à la complexité du système étudié, allant de l'usage des ressources, au contrôle des sources de pollution et aux choix des limites du système. L'incertitude liée à l'usage d'un indicateur est souvent importante dans le domaine environnemental. Cette état de fait provient des connaissances incomplètes que l'être humain a de son environnement naturel. Une décision peut avoir un effet positif localement ou pendant un certain laps de temps et aboutir ensuite à un impact négatif dans un autre compartiment de l'environnement. L'effet rebond, comme on l'appelle, est un effet indirect dû à une décision politique et/ou technologique. Ces effets peuvent être catastrophiques (Hertwich 2005).

Ainsi, lors du développement d'un indicateur, deux questions clés doivent être abordées : *Que mesure l'indicateur ?* et *Comment le mesurer ?*. Il existe dans la littérature spécialisée une multitude de manières d'aborder ces questions. Fréquemment utilisés comme référence, les principes de Bellagio ont été annoncés en 1996, suite au sommet de la terre de Rio en 1992. Dans le domaine qui nous intéresse pour cette recherche, soit l'optimisation d'un système, en l'occurrence le système industriel, ces principes indiquent premièrement qu'un système d'indicateurs doit être itératif, souple et adaptable au changement

et à l'incertitude en tenant compte de la complexité des systèmes étudiés. Deuxièmement, le système ne doit pas mélanger ce qui est désirable de ce qui est faisable dans le contexte actuel. Ce qui est désirable doit être subordonné à la faisabilité. Pour une application au concept des symbioses industrielles, un système d'indicateurs devrait essentiellement traiter de la faisabilité des synergies, tout en abordant dans un deuxième temps leur pertinence. Deuxièmement, un indicateur s'adresse à un public particulier. Un indicateur pertinent doit donc tenir compte du public cible, qui doit être clairement identifié et pour qui les indicateurs doivent être pratiques, sous-entendu facilement mesurables, correspondre aux données disponibles, être fiable, ainsi que clairement analysables (Hardi et Zdan 1997; Richards et Gladwin 1999). Dans le contexte des symbioses industrielles, le système d'indicateurs a deux groupes cibles : les entités économiques qui ont besoin d'informations claires sur la faisabilité et la pertinence d'une collaboration et les pouvoirs publics, qui eux sont essentiellement concernés par la pertinence environnementale de la solution proposée et par son potentiel de réduction des impacts environnementaux. Ces deux groupes cibles et les interactions qui existent entre eux constituent, dans le domaine de l'écologie industrielle, ce que nous pouvons appeler le contexte culturel du territoire considéré. Celui-ci a une influence prépondérante sur le degré de réussite d'un projet de recherche et de mise en œuvre de symbioses. Cependant, il est considéré ici comme un élément existant sur lequel le coordinateur peut s'appuyer, mais sur lequel il a peu d'influence.

Le développement d'indicateurs peut se faire soit sur une base quantitative ou qualitative (descriptif et intuitif). Le terme quantitatif fait référence à l'utilisation de données chiffrées, résultant de mesures calibrées. Le terme qualitatif, par opposition, utilise la description et fait appel à l'intuition du coordinateur. Le qualitatif est, en termes scientifiques, beaucoup plus subjectif que le quantitatif. Dans certains cas, un indicateur de premier ordre peut être qualitatif : en cas d'étude du contexte législatif par exemple. Mais dans de nombreux cas, la faisabilité est subordonnée à d'autres indicateurs quantitatifs.

Comme expliqué précédemment, la suite de ce chapitre d'analyse de la faisabilité et de la pertinence des symbioses industrielles ne s'appuie pas sur un système d'indicateurs. Celui-ci pourra être développé lors de futures recherches sur la base des éléments présentés dans les sections suivantes. Cependant, afin de ne pas mener cette réflexion de manière isolée, une description de deux des systèmes d'indicateur de référence utilisés en Suisse et en Europe est proposée : le système d'indicateurs du développement durable Suisse MONET et le système européen d'analyse de la performance économique EUROSTAT. Ainsi, les potentiels futurs indicateurs pourront être utilisés dans différents cantons et région de Suisse, ainsi qu'à l'étranger, moyennant une adaptation au contexte local.

MONET est un système d'indicateurs destiné à mesurer le développement durable. Il propose au public et aux acteurs politiques une liste de plus de 120 indicateurs regroupés en 26 thèmes qui sont régulièrement mis à jour. Le système est fondé sur une série de postulats qui définissent les objectifs qualitatifs du développement durable sous la forme d'exigences concrètes. Les objectifs qualitatifs du système sont la solidarité sociale, l'efficacité économique et la responsabilité écologique (de Montmollin, Altwegg et al. 2003; de Montmollin, Altwegg et al. 2003). La diffusion des résultats se fait de plusieurs manières, elle est

en constante amélioration. En particulier, 17 indicateurs clés ont été sélectionnés et servent aujourd'hui d'étalon pour évaluer les succès et les échecs de la politique du développement durable (Kollbrunner 2008). Les principaux thèmes de MONET en rapport avec les synergies régionales de ressources sont : Compétitivité et commerce internationaux (11), Production (15), Mobilité (17), Substances, déchets et effets (18), Eau (20), Energie (25) et Forêt (26).

EUROSTAT, l'Office statistique des Communautés européennes, a pour fonction de fournir des statistiques au niveau européen permettant d'effectuer des comparaisons entre les pays et les régions. Les indicateurs sont classés en 10 thèmes et ceux qui nous intéressent particulièrement en relation avec les symbioses industrielles sont le développement socio-économique (1), la consommation et la production durable (2), le changement climatique et l'énergie (6), ainsi que les ressources naturelles (8) (Schäfer, Baryn et al. 2008). En 2007, EUROSTAT a publié un rapport dont l'objectif est de mesurer les progrès pour une Europe plus durable (Ledoux, Lock et al. 2007). Dans le cadre de ce travail, le système EUROSTAT sera essentiellement utilisé comme référence pour ses indicateurs de mesure de la performance économique-environnementale d'un territoire, développés dans le thème 1 « développement socio-économique ». Ceux-ci permettent en effet de relier la consommation de ressources et la productivité des activités économiques.

4.4.2 Famille n°1 : le bois

La première famille concerne la ressource bois. Les premiers flux concernés sont le bois naturel, brut ou après transformation. Cette catégorie comprend en particulier les sciures et les copeaux de bois naturel qui ne sont pas des déchets soumis à contrôle. Vient ensuite le bois traité sous toutes ses formes et en particulier lorsqu'il est un sous-produit du secteur secondaire. Le bois à problème englobe tous les bois imprégnés de produits chimiques comme les déchets de bois traité. Cette famille comprend finalement les cendres issues de la combustion du bois naturel. Ces trois types de flux ont été détectés dans le cadre des études de cas de Genève et Vaud (Tableau 21).

La Suisse a publié en 2008 un nouveau document détaillant la politique fédérale sur la gestion de la ressource bois. Dans celui-ci, la Confédération prône une valorisation efficiente de la matière première tout au long de sa chaîne de transformation. La ressource bois est actuellement au centre de nombreux projets visant à favoriser son exploitation et son utilisation dans les domaines de la construction, de la production de cellulose, l'industrie chimique et la production d'énergie. Le marché est très compétitif et l'exploitation de la ressource se fait selon le principe de l'offre et de la demande. Cependant, la demande croissante de produits ligneux pour la production d'énergie exerce une pression sur son prix, qui augmente. Il s'agit donc de désamorcer la compétition qui s'établit entre les différents secteurs en favorisant les filières les plus efficaces économiquement et écologiquement. La stratégie de la Confédération pour la production, l'utilisation et la valorisation de la biomasse en Suisse prône une utilisation en cascade en vue d'une économie des ressources. Elle indique qu'il y a lieu, lors de l'utilisation de la biomasse, de réaliser une valeur ajoutée optimale en produisant en premier lieu des produits de haute qualité, telles que les denrées alimentaires et les matériaux de construction. Les sous-produits et les déchets générés doivent être réutilisés le mieux possible tant sur le plan de l'énergie que sous forme de matière (OFEN, OFAG et al. 2009). Au sens de la hiérarchie des déchets, la solution de la réutilisation devrait être favorisée par rapport à la valorisation énergétique. La Confédération suisse a mis en place un plan d'action bois destiné à favoriser une utilisation efficace de la ressource. Celle-ci ne fait cependant pas mention de la valorisation des co-produits et sous-produits de la filière (OFEV 2008). Ces documents permettent néanmoins de conclure que la filière bois possède un potentiel économique et environnemental important. En Suisse romande, le potentiel de la ressource est encore sous-exploité au niveau local, mais les coûts d'exploitation sont supérieurs aux prix du marché.

Les objectifs de la politique de la ressource bois sont multiples et pas toujours conciliables. Dans le cadre de projets de symbioses industrielles, la politique fédérale propose de favoriser simultanément la valorisation énergétique du bois-énergie de forêt, du bois des prairies et du bois de récupération et d'utiliser la ressource bois en cascade, c'est à dire de manière polyvalente (Krafft 2008). Légalement, la première base légale régissant la filière bois et l'utilisation de ses co-produits est la Loi fédérale sur les forêts (LFo 1991). Plus spécifique à la valorisation des co-produits et sous-produits, l'Ordonnance sur le

traitement de déchets (OTD 1990) définit les modalités de prise en charge. Si le bois est traité ou souillé, l'Ordonnance sur les Mouvements de Déchets (OMoD 2005) précise les contraintes pour les mouvements de déchets. Les lois concernant la protection de l'air (OPair 1985), de l'eau (LEaux 1991; OEaux 1998) et du sol (OPAM 1991) doivent aussi être prises en compte dans le cadre des activités de valorisation énergétique ou de réutilisation. L'analyse de la législation indique clairement que la valorisation/réutilisation du bois doit être favorisée et qu'elle est autorisée sans restriction pour les co-produits de bois naturel. En ce qui concerne le bois traité, les bases légales régissant sa valorisation sont plus contraignantes, mais laissent une marge de manœuvre suffisante pour la mise en place de projets de valorisation. Ces considérations légales valables pour l'ensemble de la famille de flux sont reprises et précisées dans les sous-sections détaillant chaque flux.

Tableau 21: Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 1 : bois. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
1.1	Sciures de bois naturel	co-produit	C	16	C	23	Echange	Sous-cyclage	Production de chaleur	D	35	Valorisation énergétique
1.2	Copeaux de bois naturel	co-produit	C	16	F	42	Echange	Sous-cyclage	Production de chaleur	D	35	Valorisation énergétique
1.3	Bois traité ou souillé	produit résiduel	F	42	E	38	Mutualisation de collecte et traitement	Sous-cyclage	Production de chaleur ou de panneaux agglomérés (R)	D	35	Valorisation énergétique ou Sous-cyclage
			F	41	E	38						
1.4	Cendres de bois naturel	produit résiduel	C	16	C	23	Echange	Sous-cyclage	DCB	E	38	Mise en décharge
			D	35	A	1						

Actuellement, du fait qu'ils ne sont pas soumis à contrôle, le bois naturel et les résidus de bois ne nécessitent aucune autorisation particulière pour être incinérés car ils ne contiennent normalement aucune substance polluante. Dans le cas de Genève, les voies suivies par le bois naturel sont :

- L'incinération en chaufferie ;
- L'incinération en UIOM aux Cheneviers pour les végétaux à risque phytosanitaire (qui représentent un risque de propagation de pathologie) ;
- L'acheminement en Italie à l'usine SIT de Mortara pour y être transformé en panneaux agglomérés (constitué de 100% de bois usagé). Le transport se fait en train.

Les résidus de bois compris dans la sous-catégorie « bois naturel » sont en totalité acheminés par Serbeco SA à l'usine SIT de Mortara. Cette usine dispose d'un système breveté de dépollution lui permettant d'exploiter par sous-cyclage une ressource qui serait autrement valorisée énergétiquement. Les détails de ce procédé ne sont pas cependant pas disponibles.

Il existe également d'autres filières en Suisse. A titre d'exemple, Holz Recycling effectue des opérations de concassage pour récupérer par tri les métaux contenus dans le bois. Un concassage final permet d'en faire un combustible. Les deux filières de valorisation, matérielle et énergétique, sont donc en compétition. Le bois à problème est quant à lui en totalité incinéré en UIOM.

4.4.2.1 N°1.1 – *Echanges de sciures de bois naturel*

Les sciures de bois naturel sont un co-produit de toute activité visant la production d'articles en bois (NOGA division C16) et en particulier les activités de sciage et de transformation du bois naturel. Dans de nombreux cas, les sciures font l'objet d'une valorisation énergétique partielle directement au sein de l'entreprise productrice, en particulier pour le chauffage des locaux. L'expérience montre que, pour être inflammables, les sciures de bois doivent être mélangées avec d'autres déchets de bois comme des copeaux ou des déchets de bois broyés qui sont également des co-produits des activités du secteur C16. Les entreprises qui ne disposent pas d'installations adaptées font appel à des prestataires externes qui les valorisent auprès d'autres installations. A titre d'exemple, cette filière existe dans le canton de Vaud pour alimenter la chaufferie communale de Longirod. La menuiserie-scierie de Freddy Ogues au Seppey (VD) prépare également des pellets à partir de ses sciures et d'autres déchets de bois broyés. Il existe cependant dans les cantons de Genève et de Vaud plusieurs menuiseries, charpenteries et scieries dont la valorisation des co-produits nécessite de parcourir plusieurs centaines de kilomètres. Le recours à un camion spécialement équipé pour la collecte implique de s'adresser à des prestataires situés à l'extérieur des territoires considérés. Cette solution correspond à une valorisation énergétique (NOGA division D35). Cette filière, techniquement maîtrisée dans le cas du bois naturel, est économiquement intéressante pour les entités pratiquant la valorisation.

Une réutilisation de la matière peut cependant être envisagée. Dans le domaine de la fabrication de produits minéraux (NOGA division C23), la fabrication de briques poreuses nécessite l'ajout d'additifs du type sciure de bois, tourbe ou charbon pulvérisé, solution qui techniquement apparaît comme réalisable (Turgut et Murat Algin 2007). Les sciures peuvent également être utilisées dans la production de ciment (Udoeyo et Dashibil 2002). Dans le cadre des études de cas de Genève et Lausanne, aucune entité pratiquant directement une de ces activités n'a été étudiée entre 2006 et 2009. Il n'existe pas de raison particulière à cela. Il existe cependant plusieurs entités du secteur C23 en Suisse romande que ces solutions pourraient intéresser. Cette nouvelle filière est une forme de sous-cyclage. Légalement, il n'y a pas d'objection à la valorisation du bois dans le cadre d'une filière de sous-cyclage étant donné que la matière première est d'origine naturelle et ne contient, par définition, aucune substance polluante (LPE

1983). La faisabilité économique est plus difficile à évaluer. L'entreprise du secteur de la menuiserie va perdre une source de chaleur qu'elle considère souvent comme gratuite et devra la remplacer par un autre vecteur énergétique, si possible non fossile. Le coût de rachat du co-produit devra au minimum permettre de compenser les coûts d'approvisionnement du nouveau vecteur et les adaptations du système de production de chaleur avec un retour sur investissement raisonnable. En ce qui concerne le bilan environnemental, le choix entre les deux filières nécessiterait une ACV complète. En effet, la fixation de la sciure dans le matériau de construction en lieu et place de la combustion permet le stockage du CO₂ qu'elle contient. Cependant, ce gain devra être supérieur à la somme des émissions dues au nouveau vecteur de la production de chaleur dans l'entité du secteur du travail du bois et des impacts générés par le transport vers l'entité du secteur de la construction.

4.4.2.2 N°1.2 – *Echanges de copeaux de bois naturel*

Les copeaux de bois naturel issus des activités de menuiserie et de transformation du bois naturel (NOGA division C23) sont essentiellement utilisés comme vecteur énergétique renouvelable. Chaque menuiserie produit d'importantes quantités de copeaux et certaines les réutilisent à l'interne pour le chauffage des locaux, en les mélangeant aux sciures. La filière de la valorisation énergétique semble être la plus courante. Or, il est envisageable de réutiliser les copeaux de bois pour couvrir les sentiers pédestres ou équestres par l'intermédiaire des entreprises du secteur du génie civil (NOGA division F42).

Techniquement, l'usage de copeaux de bois naturel pour recouvrir les chemins pédestres est commun. Cette solution est déjà largement pratiquée dans le cadre de la gestion des espaces publics des cantons de Genève et Vaud. En ce qui concerne les manèges, l'adéquation du matériau avec les critères de qualité des chefs d'exploitation doit être vérifiée au cas par cas.

La première base légale régissant la filière bois et l'utilisation de ses co-produits est la Loi fédérale sur les forêts (LFo 1991). La filière proposée correspond à une forme de sous-cyclage, mais s'agissant d'une matière naturelle, aucun obstacle légal n'existe. Comme dans le cas précédent, la faisabilité économique de la réutilisation est plus difficile à évaluer. L'entreprise du secteur de la menuiserie devra changer son approvisionnement énergétique et perdre une source de chaleur qu'elle considère souvent comme gratuite. Le coût de rachat du co-produit devra au minimum permettre de compenser les coûts d'approvisionnement du nouveau vecteur et les adaptations du système de production de chaleur avec un retour sur investissement raisonnable. En ce qui concerne le bilan environnemental, la réintroduction des copeaux dans un écosystème naturel aboutit à leur dégradation et à la libération du CO₂ qu'elle contient. Si cette solution est préférable à la valorisation énergétique au sens de la hiérarchie des déchets, sa pertinence environnementale doit encore être prouvée par la réalisation d'une ACV complète. Le coût actuel de l'énergie et la problématique du réchauffement climatique favorisent aujourd'hui la valorisation énergétique dans des chaufferies communales ou d'entreprises. Dans un contexte d'augmentation du prix des vecteurs énergétiques fossiles, le chauffage au bois permet non seulement des économies sur les

coûts d'exploitation d'un réseau de chauffage conventionnel mais aussi sur les émissions de CO₂. Ainsi, le recours à grande échelle à cette synergie qui consiste à boucler le cycle du bois en rendant les co-produits de cette matière naturelle à la terre apparaît comme peu pertinent dans le contexte économique et politique actuel. Une mise en œuvre au cas par cas pour certaines fractions paraît cependant pertinente.

4.4.2.3 N°1.3 – *Mutualisation de collecte et de traitement du bois traité ou souillé*

Troisième flux de la famille bois, les produits résiduels de bois traité ou souillé sont essentiellement issus de la déconstruction et de la rénovation de bâtiments (NOGA division F41), ainsi que du génie civil (NOGA division F42). En Suisse romande, ils ont actuellement deux débouchés possibles. Le premier consiste à sous-cycler les résidus pour produire des panneaux d'aggloméré destinés à la construction et à la fabrication de meubles. Cette solution, qui concerne la majorité des flux produits à Genève et dans le canton de Vaud (Bengoia 2007), implique l'envoi des résidus par train à Mortara dans le nord de l'Italie où se trouve une entité de recyclage du groupe Mauro Saviola. Il s'agit de la seule usine d'Europe à fabriquer des panneaux agglomérés composés entièrement de bois recyclé grâce à une technologie brevetée qui permet l'élimination des substances polluantes. La deuxième solution consiste en une valorisation énergétique en substitution à la consommation de combustibles fossiles. Dans ce cas, la principale contrainte technico-légale est l'obligation d'équiper les chaudières en procédés de traitement des fumées. Ces dispositions sont réglées par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair 1985). Le coût élevé des installations de traitement des fumées limite fortement le nombre d'unités installées sur le territoire. Dans le cas de Genève, ces flux sont incinérés en UIOM.

En conjuguant les aspects positifs des deux filières, une valorisation locale en tant que panneaux agglomérés permettrait de diminuer les émissions dues aux transports tout en favorisant la réutilisation locale du matériau. Techniquement, cette solution reste cependant difficilement réalisable pour des raisons quantitatives et qualitatives. L'usine de Mortara traite plus de 60'000 tonnes par an, ce qui semble être la quantité minimum annuelle de matière nécessaire à la mise en place d'une filière locale rentable. La deuxième contrainte provient de l'impact environnemental de cette solution, l'efficacité réelle du traitement intermédiaire n'étant pas connue. Le sous-cyclage des résidus de bois traités conduit à la diffusion des polluants qu'ils contiennent (vernis, peinture, ignifugeant) au cours de la période d'utilisation du produit. Le procédé de nettoyage des résidus avant compaction étant breveté par l'entreprise italienne, les coûts de recherche et développement pour la mise en place d'une activité concurrente et plus efficace seront élevés. En l'absence de traitement intermédiaire, la valorisation des panneaux agglomérés arrivés en fin de vie représente également un risque pour l'environnement. Ainsi si l'exportation des résidus vers l'unité de valorisation italienne est autorisée au sens de l'Ordonnance sur les mouvements de déchet (OMoD 2005), l'installation d'une telle filière en Suisse semble techniquement, légalement et

économiquement difficile. Pour limiter le processus de diffusion de polluants dans l'environnement, la solution de la valorisation énergétique apparaît comme la plus pertinente à l'heure actuelle.

4.4.2.4 N° 1.4 – *Echanges de cendres de bois naturel*

Les cendres de bois naturel sont un produit résiduel de la valorisation énergétique du bois naturel. Elles représentent environ 1% de la masse de bois consommée et se composent en majeure partie de calcium, de silicium, de potassium et de magnésium présents sous forme d'oxydes. En 2007, les 3 millions de mètres cubes de bois utilisés pour le chauffage en Suisse ont produit environ 30'000 tonnes de cendres. La majorité est éliminée par les unités d'incinération des ordures ménagères ou mises en décharge contrôlée bioactive (DCB). Cependant, un certain nombre de chaufferies valorisent également leurs cendres comme engrais dans l'agriculture soit l'épandant directement soit en les mélangeant à du compost (Keel 2007). Il est intéressant de constater que des cendres, issues d'un processus de combustion, sont éliminées par incinération. Elles se retrouvent alors mélangées aux autres résidus d'incinération qui doivent être mis, de toute façon, en DCB. La logique de cette filière est difficilement compréhensible.

La valorisation comme amendement pour l'agriculture existe déjà en Suisse. Elle représente une filière de réutilisation intéressante et permet de boucler le cycle d'utilisation de la matière en retournant au sol les matières nutritives sous la forme d'un engrais naturel de substitution. Elle permet ainsi d'éviter la mise en décharge des cendres. Cependant, seules les cendres issues de chaufferies utilisant 100% de bois naturel peuvent être considérées. Dans le cas contraire, le risque de diffusion de substances comme les métaux lourds est trop élevé. Malgré les avantages présentés précédemment, cette valorisation n'est pas recommandée en Suisse pour des raisons techniques et les expériences restent rares : selon des informations fournies par l'Agroscope Changin-Wädenswill (ACW), les cendres de bois sont beaucoup trop riches en potassium et en phosphore pour pouvoir être épandues et mettraient en danger l'équilibre physico-chimique du sol. Légalement, les exigences de qualité pour l'utilisation des engrais agricoles sont fixées par l'annexe 2.6 de l'Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux (ORRChim 2005), ainsi que par les termes de l'Ordonnance sur la mise en circulation des engrais (OEng 2001).

Une autre filière de valorisation des cendres issues de la combustion de bois naturel existe. Dans le domaine de la production de produits minéraux (NOGA division C23) comme la céramique artisanale (poterie et décoration) ou traditionnelle (terre cuite, réfractaires, carrelage, sanitaire, porcelaine), les cendres de bois présentent un potentiel important en tant que matière première de substitution (Elinwa et Mahmood 2002). Selon une étude de l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME, France), les cendres permettent de jouer sur les couleurs et sur les motifs des céramiques. Dans le domaine artisanal, cette valorisation est déjà usuelle. Les facteurs techniques clés pour un sous-cyclage

efficace sont les propriétés pouzzolaniques⁴³ des cendres dont dépend fortement la qualité du produit final (ADEME 2001). Techniquement, cette deuxième solution a l'avantage de reposer sur une caractéristique physique précise qui ne présente pas de risque pour l'environnement. En ce qui concerne le bilan économique, cette symbiose permet au producteur des cendres d'économiser la taxe de mise en décharge contrôlée bioactive et au céramiste de trouver une source complémentaire de matière première. Les cendres restent cependant un flux à faible valeur ajoutée générant un gain économique par unité échangée faible. Mais l'économie des coûts de mise en décharge ou de prise en charge par une unité d'incinération devrait lui permettre d'être rentable. La pertinence environnementale de cette deuxième solution semble également assurée puisqu'elle permet de détourner le flux de la mise en décharge ou d'une deuxième incinération.

4.4.2.5 *Synthèse et conclusion*

Les sciures et les copeaux de bois naturel produits par les menuiseries peuvent être valorisés pour la fabrication de briques ainsi que sur les chemins pédestres et équestres. Les symbioses n° 1.1 et 1.2 concernant respectivement l'utilisation des sciures dans le domaine de la construction et des copeaux sur les chemins pédestres et équestres représentent une solution réellement pertinente par rapport à la valorisation énergétique. Leur potentiel de diminution des impacts environnementaux reste cependant relativement faible, même si le dioxyde de carbone contenu dans la matière ne sera pas rejeté dans l'atmosphère pendant la durée de vie du bâtiment. En ce qui concerne la proposition n°1.3, la création d'une activité de mutualisation de collecte et de traitement du bois usagé sur le modèle de l'entreprise de Mortara doit être abandonnée pour des raisons quantitatives et qualitatives. Finalement, l'utilisation des cendres comme amendement (n° 1.4) est prometteuse, bien que non recommandée par les institutions académiques actives dans le domaine de l'agriculture. Cette solution devrait faire l'objet d'études techniques au cas par cas. De la même manière, l'utilisation des cendres issues de la combustion du bois naturel dans la construction, et en particulier dans la production de béton, est en plein essor dans certaines régions du monde, en particulier au Etats-Unis (Udoeyo, Inyang et al. 2006).

⁴³ Terme utilisé pour nommer un matériau capable, en présence d'eau, de fixer la chaux. Les pouzzolanes sont des matériaux n'ayant pas de propriétés liantes en eux-mêmes, mais qui, en se combinant avec de la chaux et en présence d'eau, forment des composés insolubles stables possédant des propriétés liantes.

4.4.3 Famille n° 3 : la cellulose et ses produits

La cellulose est un polymère formé de chaînes de glucose. Le bois, le coton et de nombreux végétaux sont constitués de fibres de cellulose. Une fois transformée, elle est le composant principal du papier et du carton. Le papier sert de support d'écriture et d'impression pour les activités économiques. Son potentiel de réutilisation est faible une fois mélangé avec de l'encre mais il est possible de le recycler. Actuellement, après conditionnement dans une presse, les balles de vieux papier et carton sont envoyées selon les différentes qualités aux usines papetières en Suisse et en Europe (France, Allemagne, Autriche, Slovénie, Espagne). Les critères de choix pour la destination du vieux papier sont en premier lieu la qualité pouvant être prise en charge par l'industrie papetière qui effectue le recyclage et en second lieu sa situation géographique. Selon l'Association de l'industrie suisse de la cellulose du papier et du carton⁴⁴, 540'000 tonnes de vieux papier ont été exportées sur les 1,35 millions de tonnes récoltées sur le territoire, tandis que 120'000 ont été importées pour des besoins spécifiques en 2006. On dénombre sur le territoire national cinq fabriques de papier : Perlen Papier (Perlen, LZ), Papierfabrick Utzendorf (à Utzendorf, BE), Karton Deisswil (Stettlen, BE), Aarepapier à Niedergösgen (SO) et Thurpapier à Weinfelden en Thurgovie (Model Group). Perlen Papier s'est récemment équipée d'une nouvelle machine qui devrait permettre d'augmenter la capacité de traitement de 350'000 tonnes supplémentaires, ce qui correspond à près des deux tiers de ce qui est exporté de Suisse. Pour le carton, l'exportation se justifie par le fait qu'une grande partie ne peut être recyclée en Suisse que par la papeterie d'Aarepapier à Niedergöschchen (SO) dont la capacité est largement inférieure aux quantités produites en Suisse.

Le carton est également produit à base de cellulose mais il est plus résistant et peut être réutilisé à plusieurs reprises pour le conditionnement de produits. Ainsi, dans le cadre des études de cas de Genève et Vaud, seule la problématique du carton a été traitée (Tableau 22).

Selon les principes de la politique de gestion des déchets en Suisse, la prise en charge du papier et du carton auprès des entités économiques est assurée par des prestataires de services privés (LPE 1983). Les bases légales régissant l'utilisation de cette ressource sont l'Ordonnance sur le traitement de déchets (OTD 1990) et, si le carton est souillé, l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005). La stratégie environnementale d'une entreprise doit en premier lieu être axée sur la réduction de la consommation et sur le choix d'une filière de recyclage efficace. A Genève, des outils de sensibilisation sont proposés aux entreprises, comme le Guide pratique *PME et développement durable* ou encore, l'action cantonale *Vos papiers, svp !*.

⁴⁴ Schweizerischen Zellstoff-, Papier- und Kartonindustrie (ZPK), <http://www.spk.ch>

Tableau 22 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 3 : la cellulose et ses produits. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
3.1	Carton	sous-produit	C	10	G	45	Echange	Réutilisation avant valorisation	Incinération (UIOM) / recyclage (hors de la Suisse)	E	38	Valorisation énergétique ou recyclage
			Nombreux secteurs									
3.2	Carton	sous-produit	Nombreux secteurs		E	38	Mutualisation de collecte et de traitement	Recyclage	Incinération (UIOM) / recyclage (hors de la Suisse)	E	38	Valorisation énergétique ou recyclage

4.4.3.1 N° 3.1 – Echanges de carton

Le carton est un sous-produit extrêmement fréquent des activités économiques du secteur secondaire. Il provient en grande partie du conditionnement des matières premières et des produits auxiliaires lors de leur entrée dans une entreprise. Le produit est alors déballé et le carton est plié ou compacté avant d'être pris en charge par un prestataire de services afin d'être recyclé. Les filières les plus communes de valorisation dans les cantons de Genève et Vaud sont la valorisation énergétique en unité d'incinération et l'exportation vers une unité de recyclage à l'extérieur du pays (Bengoia 2007). Il existe cependant une solution de réutilisation de cartons non souillés dans le cadre de plusieurs types d'activités qui permet de prolonger la durée de vie du produit. A Genève et Vaud, le potentiel existe pour la protection des véhicules lors de travaux d'entretien (NOGA division G35). Dans de nombreux cas, les entités du secteur rejettent elles-mêmes des quantités non négligeables de carton. La réutilisation de celui-ci à l'interne de l'entreprise constitue un point de départ intéressant.

En ce qui concerne les aspects légaux, une réutilisation est possible lorsque les cartons ne sont pas souillés, à savoir lorsque leur prise en charge n'est pas soumise à l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005). Techniquement et légalement, il n'y a donc aucun obstacle à cette réutilisation tant que le co-produit est de bonne qualité. Cependant, le gain économique généré est très faible par rapport à la logistique et la transformation nécessaires à la mise en place d'un échange. Les petites entités du secteur de l'entretien de véhicules ont donc peu de chance d'atteindre le seuil de rentabilité. Si l'utilisation de cartons était très répandue il y a quelques années, de plus en plus de garagistes préfèrent aujourd'hui utiliser des housses en plastique (fournies par les fabricants de voitures) ou du plastique propre coupé sur mesure pour protéger l'intérieur des véhicules lors de travaux d'entretien. En ce qui concerne le sol des garages en revanche, l'usage de cartons est toujours fréquent. Mais dans ce cas, il faut s'assurer que le

contact avec des huiles et des hydrocarbures n'empêche pas le recyclage. Les entités économiques du secteur du commerce et de la réparation de véhicules impliquées dans les études de cas se sont déclarées intéressées par cette solution. Dans le cas de Genève, l'UGC (Union Genevoise des Carrossiers) aurait pu être un élément déclencheur. En effet, pour être rentable économiquement et permettre une réduction significative des impacts environnementaux, la filière de réutilisation doit être mise en œuvre à grande échelle. Les coûts organisationnels d'une telle filière ont néanmoins été considérés comme trop élevés. Un intermédiaire à vocation sociale, comme Réalise ou le CSP, pourrait prendre en charge la transformation et la logistique afin d'éviter des coûts d'adaptation élevés qui handicapent la viabilité, déjà faible, du projet. En ce qui concerne le bilan environnemental, cette filière est pertinente étant donné que la réutilisation du flux prolonge sa durée de vie avant incinération ou recyclage. La solution devra cependant être mise en œuvre localement pour éviter les impacts liés aux transports.

4.4.3.2 *N° 3.2 : Mutualisation de collecte et de traitement du carton*

La deuxième utilisation possible du carton usagé est la mise en place d'une nouvelle activité de transformation en pâte à papier en Suisse romande. La technologie permettant de recycler le carton a déjà fait ses preuves au niveau international. Légalement, une demande d'autorisation d'exploiter une installation d'élimination des déchets pourrait être déposée. Cette nouvelle activité participerait à l'amélioration du bilan environnemental de la filière papier-carton en permettant un recyclage local et en déviant de l'incinération une part plus grande des flux sortants. De plus, elle permet potentiellement la création de nouveaux emplois dans la région. Cependant, pour qu'une entité active dans la transformation du carton usagé soit rentable, il faut un flux de cartons usagés de plus de 300'000 tonnes par année. A titre d'exemple, Genève n'a produit que 36'600 tonnes de carton et de papier en 2007. Ainsi, les cantons de Genève et Vaud ne produisent qu'une fraction de cette quantité minimale. La principale contrainte est donc d'ordre économique.

4.4.3.3 *Synthèse et conclusion*

Les deux solutions de réutilisation/valorisation du carton proposées pour les études de cas de Genève et de Lausanne s'avèrent difficiles à mettre en œuvre. La filière du papier et du carton est déjà centrée sur le recyclage. Néanmoins, en raison de l'adaptation des structures suisses de traitement, une marge de manœuvre substantielle réside dans l'adaptation des politiques publiques afin d'exploiter au maximum les infrastructures nationales pour recycler le papier usagé produit en Suisse. Par ailleurs, le rôle des collecteurs en tant qu'intermédiaires pour la réutilisation locale du papier et du carton dans la production d'emballages et d'isolations permettrait un plus grand nombre d'utilisations. A titre d'exemple, il serait pertinent d'utiliser une fois de plus le papier usagé pour des activités de conditionnement. Les repreneurs de la filière du papier seraient en mesure d'alimenter en papier usagé des activités d'emballage et de

conditionnement, allongeant ainsi la durée de vie du produit avant son recyclage. Des associations comme Partage et Réalise permettraient de recréer une économie locale de la réutilisation sous la forme d'emplois sociaux.

Plus spécifiquement, une symbiose industrielle entre le secteur de l'industrie alimentaire et les garages automobiles (n° 3.1) pourrait voir le jour si une association active dans le secteur de l'économie sociale et solidaire proposait une prestation d'intermédiaire. La principale contrainte étant liée aux coûts logistiques de l'échange par rapport à la valeur ajoutée du flux, une activité subventionnée serait plus adaptée. La deuxième solution consistant à créer une nouvelle activité de mutualisation du recyclage du carton (n° 3.2) apparaît comme difficilement réalisable pour des raisons quantitatives et de par l'existence d'infrastructures performantes situées sur le territoire suisse.

4.4.4 Famille n°4 : l'eau

La famille n°4 traite des flux d'eau sous toutes ses formes : l'eau potable, les eaux de refroidissement, les effluents liquides de toutes qualités, ainsi que l'eau traitée. Elle englobe également la ressource naturelle d'eau de surface et souterraine, pouvant être substituée à l'eau potable dans certains cas (Tableau 23).

La Suisse dispose d'abondantes réserves de cette ressource. Sa topographie fait que les cours d'eau, ainsi que les nappes superficielles et profondes sont présentes sur l'ensemble du territoire. La base légale régissant leur exploitation au niveau fédéral est la Loi fédérale sur la protection des eaux de 1991 (LEaux 1991). Dans l'application, l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux 1998) a pour but de protéger les eaux superficielles et les eaux souterraines contre les atteintes nuisibles et de permettre une utilisation durable qualitativement et quantitativement. Il existe à l'échelle cantonale une multitude de lois, ordonnances d'application, de directives et de recommandations régissant la planification, l'exploitation de la ressource, l'approvisionnement et le traitement des effluents.

La gestion de la ressource est ainsi gérée par des services dédiés. A Genève, la Direction générale de l'eau (DGEau) a pour mission de maîtriser les problèmes complexes posés par la protection et la gestion intégrée des eaux. Dans le canton de Vaud, le Service des eaux, sols et assainissement (SESA) est en charge de la protection des eaux de surface et souterraines contre les pollutions. Il veille également à prévenir les dommages à la population et à la propriété causés par l'eau en cas de crues ou d'inondations. L'usage rationnel de l'eau se retrouve également dans les missions des deux organismes. Dans sa Loi sur les eaux, le canton de Genève affiche sa volonté de veiller à une utilisation parcimonieuse de l'eau. La stratégie cantonale pour l'eau est définie par le Schéma de protection, d'aménagement et de gestion des eaux (SPAGE). Il vise à une planification intégrée des eaux par bassin versant et définit, entre autres, quels doivent être ses usages. Il n'existe cependant pas, à l'heure actuelle, de réelle politique de substitution de l'eau potable par des ressources naturelles non potables, sauf dans les activités liées à l'agriculture. Dans ce secteur, les installations de pompage dans la nappe superficielle sont fréquentes. En effet, les prestataires de service en charge de l'approvisionnement des entités économiques, les Services industriels genevois (SIG) et dans la région de Lausanne, les Services industriels de Lausanne (SIL), proposent peu d'alternatives à l'eau potable du réseau de distribution, alors qu'elles existent pour certains secteurs d'activité.

L'eau potable est une ressource coûteuse. A Genève, le prix de vente du mètre cube (m³) d'eau potable était de 1.29 CHF en 2008, alors que le montant de la taxe d'épuration était fixé à 1.50 CHF (chiffres SIG, TVA incluse). A Lausanne, les coûts seront vraisemblablement du même ordre de grandeur lorsque le canton sera passé du régime de l'impôt, en cours aujourd'hui, à celui de la taxe. Le principe de causalité ou principe dit du "pollueur-payeur" est aujourd'hui la règle de financement imposée par la législation fédérale en matière de protection de l'environnement (LPE 1983; LEaux 1991) : celui qui est à l'origine

d'une mesure prescrite par la présente loi en supporte les frais. Dans le canton de Vaud, l'épuration a longtemps été financée par l'impôt. Cette pratique historique est désormais illicite selon le droit fédéral.

Optimiser l'usage de l'eau répond donc à un double objectif. Premièrement, il est important de réduire la consommation de cette ressource et ainsi les impacts environnementaux liés à son utilisation. Cela permet d'accroître l'efficacité des activités économiques en réduisant les coûts. Deuxièmement, de nouveaux problèmes montrent les limites des systèmes de traitement des eaux usées, également très coûteux. C'est le cas en particulier des micro-polluants, qui ne sont pas traités de manière satisfaisante aujourd'hui.

La question environnementale doit être détaillée. La purification de l'eau en provenance du Lac Léman (Genève) et de la Région des Trois Lacs (Vaud), ainsi que des cours d'eau ou des nappes profondes, consomme d'importantes quantités d'énergie et de matières (produits chimiques) et engendre des impacts environnementaux non négligeables. La production d'eau potable est déterminée par deux facteurs, la consommation d'électricité et les infrastructures comme le réseau de distribution (Stokes et Horvath 2006; Vince, Aoustin et al. 2008). Une analyse de cycle de vie réalisée en Suisse par le bureau ESU-Services (Zürich) dans la région de Zürich, confirme les impacts importants de la consommation d'énergie primaire (300 l/m³) et les émissions de substances polluantes comme les oxydes d'azote et les oxydes de soufre lors des phases de production et d'approvisionnement (Jungbluth 2006).

Sur le même principe, le traitement des effluents industriels est la source d'impacts environnementaux importants. Ils sont dus aux procédés de traitement aérobie présentant la plus grande consommation d'énergie et ce même en cas de valorisation du méthane issu de la digestion anaérobie et des boues (Renou, Thomas et al. 2008; Pasqualino, Meneses et al. 2009). A Genève, la consommation énergétique des installations de traitement des eaux usées s'est élevée à 31524 MWh en 2007 pour 77259 milliers de m³ traités biologiquement, ce qui représente une consommation d'énergie de 0.4 KWh/m³ (SIG 2007). En comparant ce chiffre aux quantités traitées par année, il est possible de mesurer la réduction de l'impact environnemental (énergie) d'une substitution de l'eau potable ou d'une utilisation en cascade de l'eau permettant de réduire la quantité d'eau potable consommée et donc traitée en station d'épuration.

La recherche ne s'est intéressée que récemment à la consommation d'eau liée à la production de certains biens, cette donnée étant souvent noyée dans les données d'inventaire liées à toute étude ACV. Le concept d'« empreinte de la consommation d'eau » des biens de consommation est aujourd'hui en plein développement (Ridoutt, Eady et al. 2009). Or, en fonction de sa qualité, l'eau est une ressource aisément réutilisable dans plusieurs domaines d'activité si elle est utilisée de manière efficace et si le principe de sauvegarde du milieu naturel est respecté. Le potentiel des synergies impliquant des flux d'eau est important. Il a été abordé par la communauté scientifique dans de nombreuses régions du monde (Keckler et Allen 1998; Nobel 1998; Bixio, Thoeve et al. 2006; Urkiaga, de las Fuentes et al. 2006). Les symbioses industrielles impliquant l'eau représentent un potentiel de gain environnemental et économique non négligeable pour les entités économiques concernées (Hernández, Urkiaga et al. 2006; van Beers, Bossilkov et al. 2006; Urkiaga, de las Fuentes et al. 2008).

Les opportunités étudiées dans cette section sont au nombre de trois : la réutilisation des eaux de refroidissement dans l'agriculture ou pour d'autres procédés industriels (n° 4.1), la substitution de l'eau potable par de l'eau souterraine issue des nappes superficielles et souterraines (n° 4.2) et la réutilisation de l'eau traitée au lieu du rejet dans le milieu naturel (n° 4.3) (Tableau 23). Dans le cas de Genève, de nombreuses symbioses pré-existantes de ce type ont été identifiées. Elles sont décrites dans la Section 4.2.1.1.

Tableau 23 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 4 : eau. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
4.1	Eau de refroidissement	co-produit	C	10	A	1	Echange	Réutilisation	STEP	E	37	Recyclage
			C	21								
			C	21	C	23						
4.2	Eau souterraine et de surface	ressource naturelle	E	36	C	23	Substitution et mutualisation d'approvisionnement	Substitution de l'eau potable	Distribution d'eau potable	E	36	-
					F	41						
4.3	Eau traitée	produit	E	36	-	-	Echange	Réutilisation	Milieu naturel	-	-	Retour au milieu naturel
			E	37								
			C	26								
			C	21								

4.4.4.1 N° 4.1 – Echanges d'eau de refroidissement

De nombreuses entreprises possèdent encore des boucles de refroidissement dites ouvertes. Cela signifie que l'eau est pompée dans le milieu naturel et transite dans des échangeurs à plaques afin de refroidir des procédés industriels ou des surfaces commerciales. L'eau utilisée pour cette activité a deux origines : l'eau potable du réseau de distribution et la ressource naturelle d'eau de surface ou souterraine. Après utilisation, elle est le plus souvent rejetée directement dans le milieu naturel, essentiellement les eaux de surface. Parfois, elle est au préalable traitée en station d'épuration alors qu'elle n'a été en contact avec aucune substance potentiellement polluante. Considéré de qualité potable (lorsque la source est le réseau de distribution), ou en tout cas non pollué lorsqu'il quitte l'entité productrice, ce flux peut facilement être utilisé en cascade.

Techniquement, rien ne s'oppose à une réutilisation, pour autant que des partenaires suffisamment proches et présentant une bonne adéquation temporelle existent. Légalement, rien ne s'oppose non plus à la réutilisation de l'eau potable ayant servi pour le refroidissement. Deux conditions doivent néanmoins être remplies. Premièrement, le milieu naturel doit être respecté selon les normes fixées par l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol 1998). Deuxièmement, l'entité productrice du flux doit faire une demande d'exemption de la taxe d'épuration auprès des services compétents. Celle-ci sera acceptée si le risque environnemental est nul. En ce qui concerne les aspects financiers, la réutilisation demande un investissement significatif pour construire une conduite entre les deux entités, mais peut générer un gain économique important pour les partenaires. La réutilisation de l'eau permet d'éviter l'achat de nombreux mètres cubes d'eau potable et d'économiser le montant de la taxe d'épuration. Ainsi, l'économie potentielle est de 2.79 CHF par m³ échangé. La quantité minimum pour permettre un retour sur investissement suffisamment court est de l'ordre de plusieurs dizaines de milliers de m³ par an. Comme expliqué précédemment, l'économie d'eau se traduit directement par une réduction des impacts environnementaux liés à la purification de l'eau en amont et au traitement en aval.

Deux options se présentent pour la réutilisation de cette eau. Elle peut être réutilisée en tant que substrat matériel pour la valorisation des calories qu'elle contient. Il est possible de valoriser le flux en sortie de procédé pour éviter de diriger un flux de qualité potable et présentant un potentiel thermique directement vers les installations de traitement. Le maintien de la boucle ouverte permet ainsi d'exploiter la chaleur qu'elle contient (si le flux est important) en recourant à une pompe à chaleur, puis de réutiliser cette eau par exemple pour le chauffage de bâtiments administratifs, de logement, ou dans les zones agricoles. Le flux peut ensuite être utilisé pour l'irrigation dans le domaine de l'agriculture. Il est cependant possible d'envisager une autre option du ressort de la production plus propre. Il est en effet possible de fermer la boucle de refroidissement en utilisant un fluide caloporteur, ce qui a pour effet de supprimer la consommation d'eau mais aboutit le plus souvent à l'émission de la chaleur dans l'atmosphère par l'intermédiaire de tours de refroidissement. Celles-ci doivent alors être remplacées par des pompes à chaleur permettant une valorisation des calories.

Le principal projet suivi dans le cadre de ce travail concerne deux entités économiques du secteur de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) et de fabrication d'équipements électriques (NOGA division C27) présentes à Genève. Le flux concerné est de 80'000 m³/an d'eau de refroidissement non polluée (de qualité potable). Dans le but de concilier la valorisation de l'eau en tant que matière et de l'énergie qu'elle contient (T rejets = 20 – 30 °C), plusieurs scénarios ont été étudiés par les services compétents. Un autre cas, celui d'une entité du secteur de l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21), est également intéressant. L'entité rejette chaque année entre 50'000 et 80'000 m³ d'eau potable à une température de 70°C. Les calories contenues dans cette eau peuvent être valorisées de manière rentable. L'entreprise a signifié son intérêt pour lui trouver un débouché. En effet, le rejet devra sinon être refroidi, ce qui engendrera des coûts de l'ordre de 600'000 CHF pour l'installation et de 40'000 CHF/an pour son fonctionnement. Deux pistes sont envisagées : l'utilisation de cette eau pour le chauffage de centres

commerciaux voisins (il s'agira alors d'une boucle fermée permettant une valorisation des calories contenues dans le flux) ou la valorisation de la chaleur dans des cultures agricoles sous serres (soit en boucle fermée, soit en valorisant également l'eau pour l'arrosage).

D'autres opportunités ont été détectées dans le canton de Vaud dans les secteurs de l'industrie alimentaire (NOGA division C10), de l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21), de la production de machines, d'équipements (NOGA division C28), de produits métalliques (NOGA division C25) et d'électronique et informatique (NOGA division C 26). Dans tous les cas cependant, la faisabilité économique et parfois également technique est éliminatoire à cause des distances trop élevées entre les entités économiques concernées. Des études ciblées par l'entremise du logiciel SymbioGIS (Chapitre 3) pour chaque opportunité en tenant compte des entités économiques voisines pourraient néanmoins permettre de mettre en évidence de nouveaux potentiels.

Les synergies proposant une valorisation énergétique de la chaleur contenue dans l'eau sont détaillées dans le cadre des synergies concernant l'énergie (n° 18.2) à la Section 4.4.12.

4.4.4.2 N° 4.2 – Substitution et mutualisation d'approvisionnement en eau souterraine et de surface

De nombreux procédés industriels ne nécessitent pas une eau de qualité potable. En fonction du positionnement géographique de l'entreprise, il est possible de substituer l'eau du réseau par de l'eau de qualité non-potable en provenance d'eau de surface et de certaines nappes souterraines et superficielles⁴⁵.

Techniquement, il est nécessaire de procéder à une analyse géologique pour déterminer si la ressource est disponible à l'endroit souhaité. La seule contrainte rattachée à leur utilisation est la nécessité d'effectuer un filtrage des matières minérales et, pour les eaux de surface, organiques. Il faut néanmoins analyser sa pureté pour déterminer la faisabilité qualitative de la substitution d'approvisionnement. Les débits d'étiage des cours d'eaux alimentés par ces nappes devront bien sûr être préservés. Economiquement, cette solution peut être très avantageuse pour l'entreprise : si elle doit investir dans le forage d'un puits et supporter ses coûts de fonctionnement, elle évite les coûts liés à l'achat de l'eau potable. En ce qui concerne le bilan environnemental, cette substitution évite la consommation de ressources et les impacts environnementaux liés à la potabilisation de l'eau et/ou à son traitement après utilisation. Pour des raisons de sauvegarde des eaux souterraines, seules les nappes superficielles peuvent être envisagées en Suisse. Les nappes souterraines profondes étant destinées à l'eau de boisson, le nombre de forages est fortement limité afin de ne pas multiplier les risques de pollution. De

⁴⁵ Les nappes superficielles sont les nappes de l'alluvion récente. Elles ne sont pas protégées par les secteurs de protection des eaux et ne sont pas utilisées pour l'eau potable, car elles ont généralement une faible qualité physico-chimique (infiltrations d'eau de ruissellement, lixiviation de sites pollués, échanges avec les eaux de surface).

plus, le pompage dans les cours d'eau (sauf Lac Léman, Rhône et Arve dans le cas de Genève) est restreint pour des questions de protection des écosystèmes naturels. Dans ce cas, l'analyse technique doit déterminer si l'installation de pompage représente un risque en période d'étiage.

Le secteur de la production de produits minéraux (NOGA division C23) est un cas particulièrement intéressant pour la substitution de l'eau potable. A titre d'exemple, l'eau utilisée pour le gâchage du béton n'a pas besoin d'être de qualité potable. Le potentiel de substitution des eaux de procédé est également intéressant pour les secteurs d'activité suivants :

1. Les grands consommateurs d'eau : les entreprises de grande taille⁴⁶ des secteurs de l'alimentaire, de la chimie et de la pharmaceutique, de la métallurgie, de l'électricité et de l'électronique, des machines et équipements.
2. Les recycleurs : les entreprises spécialisées dans la collecte, le tri, le conditionnement et le traitement des déchets.
3. Les voiries et services en charge des espaces verts.
4. Les exploitations agricoles : grandes cultures, maraîchage et horticulture.

A Genève, une étude réalisée pour le compte du groupe de travail Ecosite, par l'intermédiaire du bureau de conseil en écologie industrielle Sofies, a mis en évidence les possibilités de substitution pour ces cinq secteurs. Les résultats indiquent que de nombreux cas de substitution existent (Section 4.2.1.1) mais mettent en évidence par ailleurs les multiples opportunités encore présentes sur le territoire (Carvalho et Massard 2010).

4.4.4.3 N° 4.3 – Echanges d'eau traitée

Le principal secteur d'activité rejetant de l'eau traitée est la collecte et le traitement des eaux usées (NOGA division E37). Certains autres secteurs du secondaire possèdent également des installations de pré-traitement directement sur leur site de production, afin d'éviter le rejet d'effluents trop fortement chargés en substances polluantes qui pourraient perturber le fonctionnement des stations d'épuration publiques. C'est le cas notamment dans l'industrie du travail des métaux (NOGA division C26), de l'industrie chimique (NOGA division C 20) et pharmaceutique (NOGA division C 21). Ces installations se limitent la plupart du temps à un petit nombre de procédés spécifiques à la pollution contenue dans l'effluent.

Dans certains cas, la qualité de l'eau sortant de la STEP d'entreprise satisfait les normes de l'Ordonnance sur la protection des eaux (OEaux 1998) et l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol 1998) pour le rejet dans le milieu naturel ou dans les eaux claires. L'OSol définit entre autres les teneurs acceptables

⁴⁶ Par entreprises de grande taille, on entend ici les entreprises possédant des établissements de plus de 50 employés.

en métaux lourds. Si les conditions légales sont respectées, il est envisageable de réutiliser cette eau, par exemple pour l'irrigation d'espaces verts ou pour d'autres procédés industriels ne nécessitant pas d'eau de qualité potable (Bixio, Thoeye et al. 2006; de Faria, Ulson de Souza et al. 2009). Actuellement, ces flux sont rejetés dans le réseau d'eau usée pour prévenir toute contamination accidentelle.

Les principales contraintes techniques sont donc la régularité de la qualité de l'eau et son contrôle à la sortie de l'entité productrice. L'entreprise désireuse de recourir à cette solution doit pouvoir garantir la qualité de l'eau sortant de ses installations en assurant un contrôle des paramètres qualitatifs comme les taux de matière en suspension et en matières dissoutes, la température, le pH ou le taux d'oxygène. La deuxième contrainte technique est liée aux moyens de contrôle : certaines substances spécifiques de certains secteurs d'activité ne sont pas mentionnées dans les normes données par l'OEaux, le risque qu'elles représentent pour l'environnement ne peut donc pas être évalué. Dans le cas de l'industrie du travail des métaux, les STEP internes traitent les effluents des procédés de galvanoplastie, nombreux dans le secteur de l'horlogerie et la bijouterie, à cause de leur teneur élevée en métaux lourds. Ainsi, même si la qualité du traitement est bonne, il faut être très prudent au regard des risques de pollution. Certaines entreprises du secteur pharmaceutique traitent leurs effluents en recourant à l'osmose inverse. Dans ce cas, la qualité de l'eau serait suffisante pour qu'elle puisse par exemple être utilisée comme eau de refroidissement. Economiquement et environnementalement, ces solutions méritent une certaine attention. Les effets économiques positifs liés à cette pratique ont été énoncés précédemment. Les études de cas de Genève et de Lausanne ont mis en évidence plusieurs opportunités de valorisation de l'eau traitée. Cependant, une modification de la législation semble encore nécessaire pour autoriser ce genre de débouchés.

4.4.4.4 *Synthèse et conclusion*

Deux solutions sont possibles pour diminuer la consommation d'eau des entreprises. La première consiste à utiliser plusieurs fois une eau potable ou issue des ressources souterraines ou de surface. La faisabilité dépend de la qualité de l'eau et de l'investissement économique nécessaire. La deuxième concerne les possibilités de substitution de l'eau potable par les eaux de surface ou souterraines.

Les trois types de symbioses industrielles proposées dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne sont prometteurs. La valorisation des eaux de refroidissement (n° 4.1) recèle un potentiel certain et devrait être plus répandue au sein du système industriel. Economiquement et environnementalement intéressante, cette opportunité sera discutée à nouveau dans la Section 4.4.12 consacrée aux synergies dans le domaine de l'énergie. La symbiose n° 4.3 qui vise également à une réutilisation d'un flux d'eau sortant, est nettement moins intéressante pour des raisons légales, du fait des contraintes de qualité. Elle reste cependant pertinente dans certains cas précis.

Les opportunités de substitution de l'eau potable (n° 4.2) devraient être analysées à grande échelle en s'appuyant sur les connaissances géologiques des territoires considérés. Lorsque les conditions

techniques sont remplies, la faisabilité économique semble assurée pour les activités ayant une forte demande en eau de qualité non potable. L'étude réalisée sur l'ensemble du territoire du canton de Genève en 2010 montre que de nombreux potentiels existent (Carvalho et Massard 2010). A titre d'exemple, il existe à Genève trois puits des Services industriels genevois hors service sur la commune de Satigny pour lesquels une réflexion a été initiée en vue de leur réhabilitation pour l'exploitation d'eau à usage industriel ou hydrothermique. De son côté, la Ville de Genève a décidé d'entamer en 2010 une réflexion sur le potentiel de substitution des eaux potables par des eaux de surface pour l'arrosage des parcs et jardins.

4.4.5 Famille n°5 : les encres et les pigments

Cette famille traite de la problématique des pigments, des peintures et des encres. Les pigments sont des molécules qui permettent de teinter la matière. Les pigments organiques sont issus d'organismes végétaux ou animaux, ainsi que de la chimie du pétrole. Les pigments minéraux sont principalement des oxydes ou des sulfures de métaux, comme les oxydes de chrome, de titane, de fer, de cobalt ou les sulfures de zinc ou de cadmium. La couleur désirée est fonction du métal, de son degré d'oxydation et de la nature du liant (eau, solvant) utilisé. Le mélange d'un liant et d'un pigment est alors appelé peinture ou encre.

En Suisse romande, de nombreuses entités du secteur de la fabrication de produits minéraux (NOGA division C23) utilisent des pigments pour la fabrication de matériaux de construction. Les pigments et les peintures sont également des produits résiduels fréquents des domaines de l'impression (NOGA division C18), de la fabrication de machines (NOGA division C28) ou de l'industrie chimique (NOGA division C20). Les pigments détectés dans le cadre du projet pilote de Genève sont l'oxyde de chrome, l'oxyde de titane, l'oxyde de fer et l'oxyde de cobalt. Les oxydes de titane et de chrome sont essentiellement produits par le secteur de la fabrication de produits métalliques (NOGA division C25).

En fonction de leur composition, ces substances peuvent présenter un risque pour l'environnement et leur diffusion doit être évitée. Arrivées en fin de vie, elles sont actuellement le plus souvent exploitées en cimenterie pour leur potentiel énergétique afin d'éviter leur mise en décharge ou leur diffusion dans l'environnement. Certaines peintures (vyniliques ou acryliques à l'eau par exemple) ont une teneur faible en solvants et ne nécessitent pas forcément une incinération en four à haute température ou en cimenterie. L'UIOM permet de les incinérer au prix du marché. Selon les informations collectées auprès du CTDS dans le cas de Genève, les peintures à base d'eau sont triées et envoyées en UIOM aux Cheneviers. Malgré ce tri préalable, la part de déchets de peintures incinérée en UIOM reste faible. L'incinération en cimenterie des déchets à fort pouvoir énergétique par l'intermédiaire d'un tiers opérateur (l'entreprise Cridec) est considérée comme une symbiose pré-existante. Elle a été décrite à la Section 4.3.1.

La filière de valorisation actuelle consiste en une valorisation énergétique. Même si celle-ci s'apparente dans certains cas à une symbiose pré-existante, il est souhaitable d'étudier le potentiel de réutilisation ou de recyclage des pigments et des encres. Les sous-sections suivantes proposent une solution de réutilisation dans le domaine de la construction (NOGA division C23) et la création d'une nouvelle activité de collecte et de traitement des encres et de certains pigments usagés dans le but de produire une encre recyclée (Tableau 24).

Tableau 24 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 5 : encres et pigments. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
5.1	Pigments et peintures	produit résiduel	C	25	C	23	Echange	Sous-cyclage	Cimenterie	C	23	Valorisation énergétique
5.2	Pigments et peintures	produit résiduel	C	18	E	38	Mutualisation de collecte et de traitement	Réutilisation	CTDS	E	38	Incinération
			C	20					Amstutz SA	E	38	Valorisation énergétique
			C	28					Cimenterie	C	23	Valorisation énergétique

4.4.5.1 N° 5.1 – Echanges de pigments et de peintures

Actuellement incinérés, les restes de pigments issus de la division C25 peuvent être utilisés en substitution de pigments neufs dans la construction de bâtiments ou le génie civil. En Suisse, la demande pour la coloration de bétons et de matériaux de construction est en hausse depuis quelques années. Ainsi, la première solution de réutilisation qui nous est apparue consiste à valoriser les déchets d'encres et de pigments comme substituts aux substances neuves dans la construction de bâtiments (NOGA division C23) ou le génie civil (NOGA division F42). Techniquement, la substitution est réaliste et des expériences existent. Les modifications des caractéristiques techniques du béton dues à l'utilisation de pigments sont connues (Lee, Lee et al. 2003). Cependant, les architectes hésitent à utiliser un béton coloré à partir de résidus dont la teinte ne pourra être parfaitement maîtrisée. En effet, le fabricant de béton ne pourra pas garantir la couleur choisie sur catalogue par l'architecte s'il utilise des pigments usagés.

En ce qui concerne les aspects légaux et environnementaux, cette solution mérite une analyse détaillée. Eviter l'incinération des encres et pigments en fin de vie apparaît comme une solution permettant de réduire la production et l'importation de pigments neufs. Le respect de la législation se révèle être un obstacle majeur pour la réutilisation des encres et pigments dans le domaine de la construction, et ce à juste titre. En raison du principe de précaution introduit à l'art.1 al.2 de la Loi sur la protection de l'environnement (LPE 1983), la diffusion de ces substances dans l'environnement doit être évitée. Il existe aujourd'hui un vide juridique en Suisse sur les problématiques des métaux lourds et des nanoparticules, dont les dangers pour la santé humaine et les écosystèmes sont encore largement méconnus. A titre d'exemple, l'oxyde de titane a été temporairement interdit à Genève dans le domaine de la construction à cause du vide juridique qui entoure l'utilisation de substances dangereuses dans la construction. Les

autorités souhaitent éviter de créer de manière involontaire de nouveaux sites pollués, dont les matériaux ne pourront pas être recyclés. Ainsi, si les éléments de construction en béton coloré ne sont pas interdits par la loi aujourd'hui, il est nécessaire d'appliquer le principe de précaution en attendant une nouvelle législation. Les demandes d'autorisation pour la réutilisation des pigments seront refusées tant que le vide juridique sur l'utilisation de ces substances dans la construction n'aura pas été comblé. Dans le cas de Genève, cette réutilisation, en lieu et place de l'incinération, irait à l'encontre du projet de recyclage des matériaux de construction en cours au sein du groupe de travail Ecosite. Celui-ci vise la réutilisation des matériaux de démolition (essentiellement la grave de béton) pour produire du béton à base de grave recyclée. La réutilisation de ces graves, si elles sont chargées en pigments toxiques, ne pourrait plus être effectuée et ces matériaux devraient être dirigés vers des décharges contrôlées. Les pouvoirs publics doivent éviter de donner des directives contradictoires. Pour l'instant, cette symbiose industrielle est donc considérée comme non réalisable.

Dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région, aucune solution alternative à la réutilisation dans la construction et le génie civil n'est apparue à l'heure actuelle.

4.4.5.2 N° 5.2 – *Mutualisation de collecte et de traitement des pigments et peintures*

La réutilisation en cimenterie, si elle est considérée comme une symbiose industrielle (avec intervention d'un intermédiaire) reste une forme de valorisation énergétique. Techniquement, il est aujourd'hui possible de récolter tous les restes de pigments et de peintures pour les assembler en une même et seule peinture noire, commercialisable. Une activité de ce type est actuellement inexistante en Suisse romande. Il existe donc un potentiel de création de nouvelle activité. Si cette valorisation venait à être avalisée par les autorités compétentes, il pourra alors s'agir d'une source de produits de substitution pouvant être utilisés par les services publics pour des applications peu exigeantes, comme les couches de fond, les espaces non habités, les ouvrages de génie civil, les barrières d'autoroute (NOGA division C23) ou dans le domaine de l'impression (NOGA division C18).

En revanche, les contraintes techniques sont multiples. Premièrement, la compatibilité des différents restes de peinture doit être assurée. Deuxièmement, des analyses écotoxicologiques du produit obtenu doivent être réalisées, afin d'éviter d'augmenter inutilement la toxicité de ces résidus. Du fait de la diversité des peintures sur le marché et des nombreux produits toxiques qu'elles contiennent, il convient par précaution d'encadrer étroitement une telle activité (au niveau cantonal) afin d'éviter la diffusion de substances toxiques.

La littérature spécialisée sur le sujet est pratiquement inexistante. Un diagnostic a cependant été établi pour les déchets de peintures sur le canton de Vaud en 2007 (BIRD 2007).

Il s'agit d'une activité pratiquée depuis de nombreuses années outre-Atlantique (Canada). Des bacs de récupération dans les centres de tri sont mis à disposition et enlevés par les repreneurs. Le tri est ensuite

effectué selon le type de peinture. Les éléments non recyclables (peinture sèche, contenants, etc.) sont soustraits pour être incinérés. Les peintures récupérées sont ensuite séparées par couleur pour être homogénéisées en cuves, modifiées par ajout d'additifs et filtrées. Pour autant que les flux de peintures usagées soient suffisamment importants, une activité commercialisant des peintures recyclées pourrait se révéler rentable.

Une petite structure de taille artisanale de récolte, tri et reconditionnement des restes de peintures pourrait occuper ce secteur. Cette solution pourrait être économiquement intéressante pour les entités économiques productrices du produit résiduel en permettant la revente des résidus et l'économie de la taxe d'incinération. La quantité de résidus de peinture étant considérable, de l'ordre du millier de tonnes par an, dans la région lémanique, il est acquis que cette activité présente du potentiel. Pour assurer la rentabilité du projet, il reste à trouver des débouchés satisfaisants pour le produit recyclé. L'adéquation qualitative est ici un élément primordial de l'indicateur de faisabilité économique. Pour l'instant, le vide juridique concernant la réutilisation de produits toxiques incite, à juste titre, l'Etat à la prudence concernant les autorisations d'exploiter et d'utiliser ces substances.

4.4.5.3 Synthèse et conclusion

Les synergies visant les échanges de pigments, de peintures et d'encre usagés (n° 5.1) ne sont pas souhaitables aujourd'hui en Suisse. Leur réutilisation en cascade dans la filière des matériaux de construction colorés est à exclure. Les risques inhérents à la dissémination de substances polluantes et à l'augmentation progressive de leur concentration dans les matériaux de construction recyclés sont en effet trop importants.

En revanche, la création d'une nouvelle activité de recyclage, impliquant la collecte et le traitement conjoints des résidus de peinture de l'industrie (n° 5.2) apparaît comme une opportunité intéressante dont la faisabilité dans le contexte romand devrait être approfondie. La faisabilité légale et la pertinence environnementale sont cependant handicapées par le risque avéré que représentent ces substances pour l'environnement.

4.4.6 Famille n°7 : les huiles et les graisses

La famille n°7 regroupe tous les types de matières grasses, soit les huiles et les graisses. Ces deux sous-familles se différencient par leur état : liquide pour les huiles, solide pour les graisses. Les matières grasses peuvent être d'origine animale, végétale, minérale (produite à partir d'hydrocarbures) ou issues d'une synthèse chimique. Les principales huiles et graisses utilisées par les activités économiques en Suisse romande sont les graisses, les huiles minérales et les huiles végétales. Les deux premières ont pour fonction principale la lubrification de pièces métalliques en mouvement, comme des machines-outils et des moteurs. Dans les secteurs de la fabrication de produits métalliques (NOGA division C25) et la fabrication de machines et d'équipements (NOGA division C28), les huiles sont également combinées à de l'eau (5 – 10 % d'huile pour 90 à 95 % d'eau) pour l'usinage des pièces métalliques. Elles sont alors nommées huiles de coupe. Finalement, les huiles végétales sont essentiellement utilisées dans la production et la préparation de denrées alimentaires, par exemple sous la forme d'huile de friture.

En fin de vie, les huiles et graisses deviennent des sous-produits. Leur valeur économique est faible. Elles ont la plupart du temps perdu leurs propriétés lubrifiantes ou elles sont souillées. Les déchets huileux et graisseux, quelles que soient leurs origines, sont considérés comme des déchets spéciaux au sens de l'Ordonnance sur les Mouvements de Déchets (OMoD 2005). Ils se divisent en deux classes. La première englobe les huiles et combustibles liquides usagés comme les huiles de moteur, de boîte de vitesse et de lubrification qui proviennent essentiellement des secteurs suivants : NOGA divisions C23, C25, C28, G45 et Q86. Une source d'huile fréquente est liée aux activités de transport présentes dans de nombreuses entités économiques. Dans le cas de Genève, la majorité des huiles de moteur sont collectées et conditionnées par Altola AG à Berne. Elles sont ensuite valorisées en cimenterie par Ciments Vigier SA (2603 Pery), Holcim AG (5303 Würenlingen), ou Jura-Cement-Fabriken (5103 Wildegg).

La deuxième classe est constituée de déchets urbains et assimilés provenant des ménages, des industries et des commerces. Elle concerne les huiles et matières grasses végétales utilisées dans l'alimentaire (NOGA division C10). Il existe deux filières de valorisation. Quand elles arrivent en fin de vie, l'entreprise Bio Léman Énergie à Corsier (GE) réceptionne de grandes quantités d'huiles alimentaires usagées des régions genevoises et lémaniques pour la fabrication de biodiesel. La seconde filière consiste également en une valorisation en cimenterie.

Comme nous allons le voir dans les sous-sections suivantes, il existe une certaine flexibilité juridique afin qu'avec l'aval des autorités compétentes, les huiles végétales et minérales, ainsi que les huiles de coupe puissent être réutilisées ou valorisées énergétiquement (Tableau 25). Dans ce cas, les installations qui pratiquent cette valorisation devront être équipées de manière à respecter la législation environnementale en vigueur, notamment en matière de pollution de l'air (OPair 1985).

Tableau 25 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 7 : huiles et graisses. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
7.1	Huiles de moteur et de lubrification	sous-produit	G	45	C	23	Symbiose pré-existante	Valorisation énergétique	Cimenterie	C	23	Valorisation énergétique
			C	26								
			C	25								
			C	23								
			Q	86								
7.2	Huiles de coupe	produit résiduel	C	28	E	38	Mutualisation de collecte et de traitement	Réutilisation	CTDS	E	38	Incinération
			C	25						E	38	
7.3	Huiles végétales	sous-produit	Q	86	C	23	Symbiose pré-existante	Valorisation énergétique	Cimenterie	C	23	Valorisation énergétique
			C	10								
			C	26	E	38						

4.4.6.1 N° 7.1 – Valorisation énergétique des huiles de moteurs et de lubrification

Cette symbiose a pour objectif la réutilisation des huiles de moteur vidangées, produites par les activités d'entretien de véhicules (division NOGA G45) et par la plupart des activités économiques (activités liées à la logistique et au transport), ainsi que les huiles de lubrification utilisées pour la production de produits métalliques et électroniques (NOGA division C 25 et C26).

En fin de vie, les huiles usagées peuvent être substituées aux fiouls lourds utilisés par certains fours et chaudières ou aux combustibles fossiles utilisés en cimenterie. La valorisation énergétique de sous-produits d'huiles de moteurs, comme fioul de substitution, est largement pratiquée en Suisse romande. En Suisse romande, un grand nombre d'entités économiques valorisent déjà énergétiquement leurs huiles de moteur et de lubrification en cimenterie par l'intermédiaire de l'entreprise Cridec SA (NOGA division C23) (Section 4.3.1).

Kanokkantapong (2009) propose une évaluation environnementale des filières de valorisation énergétique. L'utilisation comme combustible de substitution en cimenterie apparaît comme la solution la plus favorable à cause de la température élevée de combustion et de la capture des métaux lourds dans le ciment produit. Dans ce cas, il n'y aurait en principe pas de risque de pollution atmosphérique.

Techniquement, les chaudières et fours à fioul lourd utilisées par exemple pour la production de produits minéraux (NOGA division C23) ont des températures de fonctionnement inférieures aux cimenteries, ce qui handicape la combustion des matières organiques et la capture des métaux lourds. De plus, elles doivent être techniquement adaptées à ce type de combustibles pour répondre aux exigences légales de l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair 1985). Autre aspect technique, le pouvoir calorifique de ces huiles doit être au moins égal à celui du fioul lourd qu'elles substituent. Le transport et surtout l'entreposage des huiles en attente d'être incinérées doivent également être effectués en accord avec les ordonnances sur les mouvements de déchets (OMoD 2005) et sur le traitement des déchets (OTD 1990). En conclusion, l'incinération en chaudière ou four à fioul lourd permet d'améliorer considérablement le bilan environnemental de ces installations en diminuant la consommation de combustible fossile, ce qui entraîne par ailleurs une diminution des coûts d'exploitation. Cependant, la diffusion de polluants dans l'atmosphère apparaît comme une contrainte importante dans le cas de cette valorisation.

Pour conclure, l'incinération en cimenterie constitue une symbiose industrielle pré-existante en Suisse romande. Cependant, il ne s'agit pas d'une réutilisation à proprement parler. Il existe des filières de valorisation permettant dans certains cas une réutilisation du flux (Al-Omari 2008; Kanokkantung, Kiatkittipong et al. 2009). L'extraction sur support d'argile en milieu acide et l'extraction au solvant sont deux solutions aujourd'hui techniquement réalisables. Leur applicabilité dans le cas de la Suisse romande devrait faire l'objet d'un approfondissement.

4.4.6.2 N°7.2 – Mutualisation de collecte et de traitement des huiles de coupe

Les huiles de coupe sont un flux composé de 5 à 10 % d'huile minérale mélangée à de l'eau. Utilisées dans le domaine de l'usinage des métaux, elles sont projetées sous pression à l'interface entre l'outil et la pièce métallique à usiner. Ses fonctions sont de lubrifier et de refroidir (Marano, Smolenski et al. 2001). En Suisse, les huiles de coupe sont utilisées essentiellement dans les domaines de la fabrication de machines (NOGA division C28) et l'industrie horlogère (NOGA division C26).

Une fois arrivé en fin de vie, le mélange, qui a perdu ses capacités lubrifiantes, contient des particules métalliques solides et dissoutes. L'évolution technologique des procédés et des machines d'usinage rendent possible la réutilisation des huiles de coupe un grand nombre de fois, grâce à l'existence de bassins de décantation, de filtres et de centrifugeuses de petite taille intégrées aux machines-outils. Cette solution, parce qu'elle permet la récupération et le traitement du flux au sein du procédé, relève du domaine de la production plus propre.

Même lorsque les procédés d'usinage ont été optimisés, les huiles de coupe deviennent malgré tout inutilisables après un certain nombre de cycles d'utilisation. Dans le cas de Genève, les flux de produits résiduels, composés de plus de 90% d'eau, étaient incinérés au CTDS jusqu'en 2007. L'incinération d'un flux contenant une majorité d'eau ne constitue pas un optimal environnemental. Or, le recours à la centrifugation permettrait une séparation des composants du flux afin de les valoriser séparément. L'huile

récupérée peut être utilisée soit dans un nouveau mélange lubrifiant, même après les cycles de réutilisation mentionnés précédemment, soit pour la valorisation énergétique en tant que combustible de substitution en cimenterie. En effet, ces installations de centrifugation, bien plus performantes que celles incorporées aux machines-outils, permettent de prolonger la durée de vie du flux ou d'optimiser sa fin de vie.

De telles installations sont coûteuses pour des unités de production de petite taille comme celles qui existent en Suisse romande. Une solution consisterait en la mutualisation de la collecte et du traitement afin de regrouper les entités économiques autour d'une installation commune. Cette symbiose a fait l'objet d'un travail de recherche à l'Université de Lausanne et à l'EPFL (Carvalho, Harbi et al. 2006). Ce travail a montré qu'une telle installation, pourtant réalisable d'un point de vue qualitatif, nécessiterait pour être rentable une quantité de déchets bien supérieure à celle détectée dans les études de cas de Genève et de Lausanne. De plus, en cas d'installation chez un industriel, ce dernier devrait obtenir une autorisation d'exploiter une installation d'élimination de déchets, au sens de l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005). En revanche, si la centrifugeuse est mobile, elle peut être partagée entre plusieurs industriels et une telle autorisation n'est pas nécessaire. Ce dernier cas s'apparente alors à une symbiose de mutualisation. En ce qui concerne la pertinence environnementale, cette solution se justifie par la prolongation de la durée de vie du produit. Une analyse de cycle de vie comparant les différentes filières de valorisation a montré que les impacts générés par la centrifugeuse étaient faibles en comparaison des bénéfices de la prolongation de la durée d'utilisation des huiles. En matière de bilan économique, l'acquisition de la centrifugeuse représente un investissement à long terme. En contrepartie, l'entité économique récupérant ses huiles de lubrification économise non seulement sur l'achat d'huile neuve mais aussi sur la taxe d'incinération des huiles usagées.

A Genève, projet pilote où cette solution a été envisagée, cette symbiose n'a pour l'heure pas été mise en place pour des raisons d'adéquation quantitative. Les flux d'huile de coupe dans les entreprises du projet ne sont pas suffisamment importants pour la rendre économiquement intéressante. Une solution consisterait à intéresser un recycleur. Celui-ci, en jouant le rôle d'intermédiaire, pourrait récupérer et valoriser l'huile récupérée selon les filières existantes : valorisation matière ou énergétique.

4.4.6.3 N° 7.3 – Valorisation énergétique des huiles végétales

Plusieurs entités économiques des régions de Genève et de Lausanne rejettent un sous-produit d'huile végétale. Les flux proviennent essentiellement de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) ainsi que des activités de restauration rattachées à d'autres secteurs d'activité comme la santé humaine (NOGA division Q86) ou l'industrie de l'informatique et de l'électronique (NOGA division C26). Dans ce dernier cas, il s'agit en grande partie d'huiles de friture usagées.

Les huiles en fin de vie sont en général valorisées énergétiquement. Leur pouvoir calorifique est effectivement proche d'un combustible fossile. Deux filières existent qui constituent toutes les deux des

symbioses pré-existantes en Suisse romande. La première consiste en une valorisation en cimenterie. Cette solution est reconnue comme efficace sur le plan économique et celui de la performance environnementale (4.3.1). La deuxième solution est proposée par les sociétés Bio Léman Energie, dont l'activité a été détaillée précédemment, et Biocarb SA, localisée à Genève. Cette dernière récupère les huiles végétales usées pour fabriquer du biocarburant. Cette symbiose pré-existante permet de valoriser les huiles végétales usagées par l'intermédiaire d'un processus d'estérification produisant un carburant de substitution et du glycérol valorisable dans l'industrie des cosmétiques. D'un point de vue environnemental, cette solution est préférable à l'incinération en cimenterie car elle exploite la caractéristique de mobilité des combustibles liquides et fournit de plus une alternative à l'utilisation des carburants pétroliers pour l'automobile (4.2.1.2). Plusieurs technologies performantes existent et peuvent participer à la production efficace de combustibles liquides renouvelables (Korhonen 2002; de Souza, dos Santos et al. 2009; Demirbas 2009).

La collecte et le recyclage étant soumis aux règles de l'offre et de la demande, les parts de marché des deux filières varient d'une année à l'autre. Il apparaît comme difficile à l'heure actuelle d'en favoriser une plutôt qu'une autre.

4.4.6.4 *Synthèse et conclusion*

Les trois pistes concernant les huiles et graisses se heurtent à plusieurs difficultés. Premièrement, les solutions issues de la production plus propre permettent une utilisation efficace des flux et une réutilisation à l'interne de l'entreprise. Les huiles et graisses usagées se retrouvent néanmoins finalement dans l'une des filières détaillées précédemment. Deuxièmement, des filières de valorisation énergétique efficaces et rentables existent à l'échelle intercantonale. Elles s'apparentent même à des symbioses industrielles tout en étant une forme de valorisation énergétique.

Les nouvelles solutions proposées pour gagner en efficacité font face à des problèmes techniques, économiques et environnementaux. Il semble difficile de mettre en avant une plus-value justifiant la modification de la filière existante. Premièrement, l'efficacité des procédés de combustion et la difficulté de mettre en œuvre une technique de réutilisation handicapent la réutilisation des huiles de lubrification et de moteur (n°7.1). Deuxièmement, la mutualisation de traitement des huiles de coupe (n° 7.2) se heurte à un problème d'adéquation quantitative majeur sur les territoires considérés, ce qui compromet sa faisabilité économique. Les flux identifiés entre 2006 et 2008 ne permettent pas la mise en place d'une mutualisation de traitement et l'étude de cette filière devrait être étendue à l'ensemble de la Suisse romande. Troisièmement, la valorisation des huiles végétales (n° 7.3) en cimenterie ou pour la production conjointe de biocarburant et de glycérol est déjà fortement répandue en Suisse romande. Répondant aux lois du marché, ces filières sont difficiles à influencer. Elles se mettent en place d'elles-mêmes depuis plusieurs années à partir des considérations essentiellement financières.

4.4.7 Famille n°9 : les matériaux inertes

Les matériaux inertes sont des matières premières ou des déchets qui ne subissent aucune modification physique, chimique ou biologique importante dans le temps. Ils englobent l'ensemble des matières minérales utilisées dans le secteur de la construction. Ainsi, la famille n° 9 traite des flux de matière des secteurs de la fabrication de produits minéraux (NOGA division C23) et du génie civil (F41 et F42), ainsi que la co-production de matériaux inertes dans le cadre d'autres activités industrielles comme le traitement des eaux (NOGA division E36) ou l'usinage de pièces métalliques (NOGA division C28). Dans le contexte de Genève et de Lausanne Région, plusieurs flux ont été détectés. Les flux entrants sont principalement des graves, des sables et de l'argile, issus des carrières ou importés, ainsi que des matériaux bitumineux et des produits finis, comme des briques et du ciment. En ce qui concerne les déchets inertes (flux sortants), il s'agit de matériaux issus de la démolition de bâtiments et ouvrages d'art, comme les graves ou des déchets mélangés de béton et de bitume, de résidus de production de produits minéraux, comme des résidus d'argile cuite ou des blocs de béton produits en excédent, ainsi que des sables issus de fonderie, de traitement de surfaces ou du dessablage en STEP (Tableau 26).

En 2006, la Suisse a produit près de 10 millions de tonnes de déchets minéraux. Quantitativement, il s'agit du déchet le plus important. Le traitement et la valorisation de ces déchets sont régis au niveau fédéral par la Loi sur la protection de l'environnement (LPE 1983), la Loi sur la protection des eaux (LEaux 1991) et l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990). Pour éviter que ceux-ci soient trop rapidement dirigés vers les décharges contrôlées pour matériaux inertes (DCMI) prévues par la loi pour leur stockage final à long terme, la Confédération a élaboré en 1997 une directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. Celle-ci, rééditée en 2006, porte sur la valorisation des déchets de chantier en vue de favoriser leur réutilisation, sur l'élimination des matériaux goudronneux et la fabrication de granulats de tuiles certifiés (OFEV et Schenk 2006). Cependant, leur réutilisation implique de respecter de nombreuses contraintes techniques et de trouver des débouchés acceptables pour les professionnels et l'opinion publique. La directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (OFEFP 1999) fixe les critères de qualité qui permettent de déterminer si un déchet minéral peut être valorisé et, le cas échéant, sous quelles conditions et avec quels traitements préalables (Figure 63).

A Genève, le groupe de travail Ecosite mène depuis 2004 un projet destiné à mettre en place une nouvelle filière de recyclage des déchets de démolition. L'étude du métabolisme des activités économiques du canton de Genève a, sur la base des chiffres de l'année 2000, mis en évidence que les matériaux inertes représentent la première ressource consommée à Genève, après l'eau (Faist, Frischknecht et al. 2003) :

La consommation totale du béton et des briques est de 1'043'000 t pour l'année 2000. Plus de 85% de cette quantité est du béton. Le béton et les briques sont utilisés principalement dans les procédés « ménages » (513'000 t) et « secteur tertiaire » (450'000 t). [...] Un peu moins de 50%

des matériaux de construction sont produits à Genève. Il s'agit avant tout de gravier, de sable et de briques. Les importations comprennent 321'000 t de gravier et sable de la France, 132'000 t de ciment venant de la Suisse et 112'000 t de briques venant pour une grande partie de la Suisse ou de la France.

Ces résultats ont été repris dans un document public édité par l'Etat de Genève en 2005. Celui-ci conclut en indiquant que les ressources exploitables présentes dans le canton de Genève seront épuisées d'ici 15 à 20 ans, soit à partir de 2020 déjà. Dans ce cas, les transports augmenteront fortement de part la nécessité d'importer les matériaux nécessaires depuis la France et les cantons voisins (Erkman 2005). La situation était inchangée en 2007, puisque 450'000 m³ de graves à béton ont été excavés à Genève et 350'000 m³ ont dû être importés depuis la France voisine pour répondre aux besoins des secteurs de la construction et du génie civil. Les dernières estimations parlent maintenant de 30 ans de réserves (GESDEC 2009).

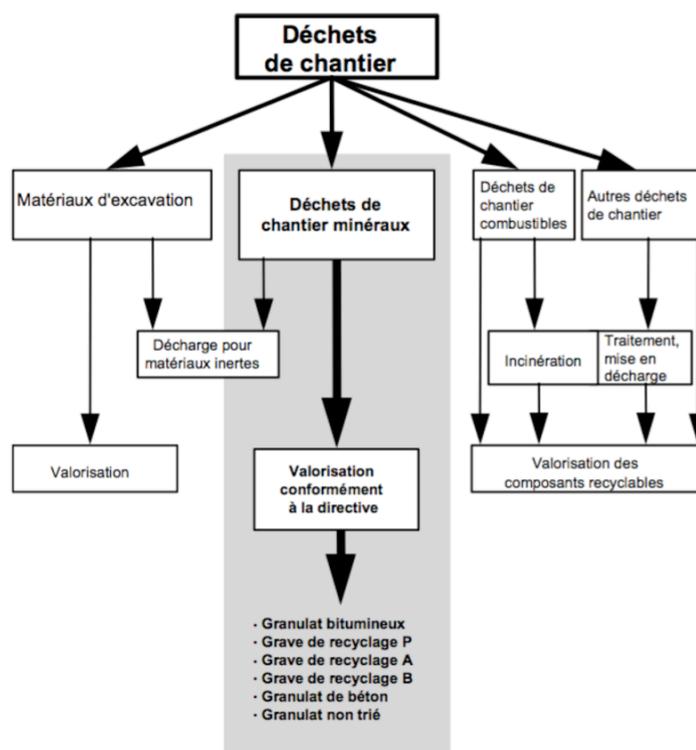


Figure 63 : Différentes catégories de déchets de chantier et filières de valorisation selon la directive de la Confédération helvétique. Source : (OFEV et Schenk 2006).

Sur la base de ce constat, le groupe de travail Ecomat^{GE} tente depuis 2002 de mettre en place des plateformes de traitement des déchets inertes en vue de produire de la grave recyclée remplissant les exigences légales de la production de béton neuf. Le produit, appelé béton à base de grave recyclée, peut être utilisé pour produire de nouveaux ouvrages. Les objectifs du groupe sont les suivants (Figure 64) :

- Tripler la durée de vie des ressources endogènes en divisant par trois l'extraction de grave sur le territoire du canton ;
- Réduire la quantité de déchets de démolition déposés en décharge pour matériaux inertes (les gravières) car celles-ci sont pleines, ce qui induit une exportation des déchets en dehors des limites cantonales.

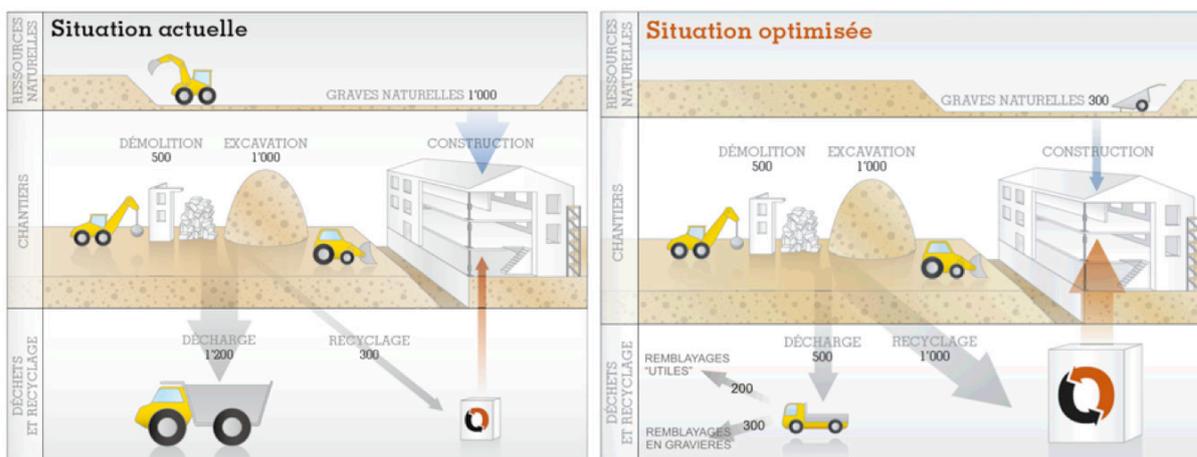


Figure 64 : Projet de modification de la filière des matériaux de construction et de démolition dans le canton de Genève. Source : (GESDEC 2009).

Plusieurs types de matériaux inertes peuvent entrer dans la composition de la grave recyclée : de la grave à béton recyclée issue des déchets de démolition, des sables usagés ou des déchets d'argile cuite. La préparation de ces matières premières secondaires implique des procédés de tri et de nettoyage. En Hollande, des projets similaires favorisent un traitement thermique intermédiaire pour séparer la grave des résidus de ciment qui y sont collés. Ce procédé permet d'éliminer 98% du ciment contenu dans le béton de démolition (Mulder, de Jong et al. 2007). Il ne semble pas que cette solution soit utilisée en Suisse où la séparation a uniquement lieu par concassage puis par calibrage de la matière afin qu'elle puisse être substituée aux graves naturelles.

Plusieurs demandes pour l'installation de plateformes de concassage – calibrage ont été déposées auprès du GESDEC depuis 2005, preuve de la pertinence de cette proposition. En effet, une étude approfondie sur le modèle économique de cette nouvelle solution montre que la grave recyclée peut être produite à un prix identique à celui de la grave extraite du sous-sol (Schoenenberger et Arnold 2004). En 2010, plusieurs autorisations ont d'ailleurs déjà été délivrées.

Afin d'informer les différents corps de métier actifs dans le secteur de la construction, l'Etat de Genève a produit un guide à l'intention des professionnels indiquant les caractéristiques et la qualité des matériaux recyclés recommandés par Ecomat^{GE}. Celui-ci détaille et rend compte des tests réalisés pour s'assurer des propriétés des bétons recyclés selon les normes SIA (GESDEC 2009).

Ces dernières années plusieurs chantiers publics pilotes, en particulier deux espaces de collecte des déchets (ESREC), ont été construits en béton à base de grave recyclée. Malgré cela, les acteurs de la construction hésitent encore à se lancer dans la réutilisation directe de ce matériau, et ce pour deux raisons. Premièrement, les entreprises du secteur de la construction, qui manquent de place, réclament de longue date des terrains pour entreposer des matériaux en attente de réutilisation (stockage temporaire). Une solution devrait se présenter avec la nouvelle loi sur les gravières. Actuellement, celle-ci interdit le traitement de matériaux usagés entrant dans une gravière, même si cette dernière dispose d'une installation de préparation de la grave excavée. Des zones de dépôt, triage, calibrage, lavage seraient ainsi disponibles. En 2010, la modification de la loi sur les gravières était sur le point d'être acceptée. Deuxièmement, si le matériau recyclé contient des impuretés, sa réutilisation est considérée comme du sous-cyclage. Cette solution étant interdite par la Loi sur la protection de l'environnement (LPE 1983), ces matériaux inertes sont condamnés à terminer leur vie en décharge contrôlée pour matériaux inertes (DCMI). Si la loi sur les gravières est modifiée, un flux auparavant dirigé vers une DCMI pourra alors être réutilisé par l'intermédiaire d'une zone de reconditionnement. La législation genevoise donne une limite inférieure de 97.5% (en % du poids) pour la teneur en gravats des matériaux inertes de démolition pour la mise en décharge contrôlée pour matériaux inertes (LGD 1999). La Confédération est moins exigeante, elle demande 95% (OTD 1990). En dessous de ce taux, les flux doivent aller en décharge contrôlée bioactive.

A Genève, la plupart des flux de matériaux inertes issus de la démolition devraient à l'avenir être dirigés vers les plateformes de concassage – calibrage en cours d'autorisation dans le canton de Genève. Cependant, certains flux de matériaux inertes échappent pour l'instant à cette dynamique : sable de décantation, issu de fonderies ou du traitement de surface et déchets d'argile cuite. Même s'ils ne sont quantitativement pas aussi importants, des solutions de valorisation peuvent être envisagées au cas par cas. Les sous-sections suivantes proposent des pistes de symbioses industrielles permettant leur réutilisation (Tableau 26).

Tableau 26 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 9 : matériaux inertes. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
9.1	Sable de décantation	sous-produit	E	36	C	23	Echange	Sous-cyclage	DCMI	E	38	Mise en décharge
			E	37	B	8						
9.2	Sable issu du traitement de surface	sous-produit	C	23	C	23	Echange	Sous-cyclage	DCMI	E	38	Mise en décharge
9.3	Sable issu de fonderie	sous-produit	C	28	C	23	Echange	Sous-cyclage	DCMI	E	38	Mise en décharge
9.4	Gravier et béton	sous-produit	F	42	C	23	Echange / mutualisation de traitement	Recyclage	DCMI	E	38	Mise en décharge
			C	23								
9.5	Argile cuite	sous-produit	C	26	F	42	Echange	Sous-cyclage	DCMI	E	38	Mise en décharge
			C	23								

4.4.7.1 N° 9.1 – Echanges de sable de décantation

Le sable de décantation est un produit résiduel issu du procédé de dessablage des installations de traitement des eaux (NOGA division E37). Il est actuellement mis en décharge pour matériaux inertes alors qu'il peut se substituer à une partie du sable naturel utilisé pour la fabrication de béton (NOGA division C23 et B8). Légalement, cette substitution peut être autorisée si les analyses prouvent qu'il répond aux exigences fixées par les annexes 1 et 2 de la Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (OFEFP 1999). Le taux d'impureté, et en particulier de matière organique, doit être inférieur à 5%. Pour les professionnels des produits minéraux, il ne doit pas non plus contenir d'impuretés de grande taille (mégots, limailles,...) qui puissent nuire à l'aspect esthétique du matériau final. Finalement, il doit avoir une teneur en eau faible.

En termes de faisabilité économique, l'entreprise peut récupérer gratuitement un flux pouvant se substituer à la matière première. Parallèlement, l'entité productrice économise le coût de mise en décharge. Comme il n'est pas nécessaire de mettre en place des infrastructures et les kilomètres parcourus ne changent pas de manière significative, les autres paramètres économiques de l'échange ne sont pas significatifs. La justification environnementale est du même ordre : le flux est détourné de la mise en décharge contrôlée pour matériaux inertes afin d'être réutilisé, sans induire un risque supplémentaire pour l'environnement.

Cette substitution s'inscrit parfaitement dans le cadre de la volonté politique genevoise d'économiser la grave naturelle en réutilisant les matériaux inertes. A Lausanne, la même filière de valorisation est également envisagée, mais le processus d'analyse de faisabilité, qui doit être partiellement répété pour convaincre les acteurs économiques que la solution est adaptée à leur territoire, est moins avancé.

En conclusion, cette opportunité apparaît comme faisable, même désirable. Cependant, elle n'a pas abouti à l'heure actuelle pour des raisons quantitatives. En effet, la production annuelle de sable de la STEP la plus importante du canton de Genève correspond à environ un jour de consommation annuelle d'un grand producteur de béton. L'adéquation quantitative pose donc un problème. En effet, l'entreprise réceptrice n'est pas prête à prendre un risque et à modifier ses habitudes pour une quantité aussi petite.

4.4.7.2 N° 9.2 – *Echanges de sable issu du traitement de surfaces*

Certaines entités du secteur de la fabrication de produits minéraux (NOGA division C23), auditées dans le canton de Genève, utilisent du sable pour la finition de surfaces en béton. Après utilisation, le sable n'est pas incorporé dans la fabrication d'autres produits pour des raisons techniques. Le sous-produit est donc dirigé vers une décharge pour matériaux inertes. Dans certains cas, le sable est réutilisé pour des aménagements extérieurs (avant sa mise en décharge), par l'intermédiaire d'une carrière au pied du Salève (NOGA division B8), qui s'occupe de son nettoyage et de sa préparation. En particulier, une grande partie est réutilisée sur des pistes d'équitation dans un manège. Cette symbiose pré-existante permet la valorisation de 1'400 m³/an de sable, évitant ainsi leur mise en DCMI (Section 4.2.1.3).

Il existe cependant une solution plus directe pour laquelle la demande est importante et constante : l'incorporation de ce sable comme matériau de substitution dans la fabrication de béton à base de grave recyclée. Techniquement, la symbiose est réalisable. L'adéquation quantitative ne pose pas de problème sérieux dans ce cas car l'entreprise qui produit le déchet peut se défaire de l'intégralité du flux. Cela ne représente qu'une petite part des besoins de l'entité utilisatrice, mais sans compliquer de manière excessive l'approvisionnement étant donné que ce flux transite de toute façon par une gravière (NOGA division B8). En ce qui concerne l'aspect légal, le sable ne possède aucune impureté (< 5%) et répond aux exigences de la Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais (OFEFP 1999). Les avantages économiques sont toutefois faibles pour les entreprises concernées. Cependant, une incorporation dans le béton pourrait être écologiquement plus intéressante dans le cas de Genève car les partenaires potentiels de l'entité sont situés à proximité de son site de production.

En résumé, cette symbiose est intéressante dans le cas où le flux est actuellement destiné à la mise en décharge. Lorsqu'une réutilisation existe déjà, le critère géographique doit être pris en compte pour favoriser l'usage le plus local possible, compte tenu du poids de ce matériau.

4.4.7.3 N°9.3 – *Echanges de sable issu de fonderies*

Le sable issu de fonderies est un sous-produit de l'industrie de la transformation de métaux (NOGA division C25). Il se trouve par exemple dans les moules utilisés pour la production de produits métalliques (NOGA division C28). Le sable est en général utilisé plusieurs fois avant d'être considéré comme un déchet. Lorsque les caractéristiques techniques ne conviennent plus pour la formation de moules, le sable, qui est mélangé avec un additif, est dirigé vers une décharge contrôlée (DCMI ou DCB, en fonction du taux d'impuretés). La symbiose industrielle consiste une nouvelle fois en la substitution du sable naturel par du sable issu de fonderie pour la fabrication de produits minéraux (NOGA division C23).

Techniquement, la réutilisation des sables de fonderie en substitution de la partie fine de la granulométrie de la grave à béton est réalisable. Les propriétés du matériau ne semblent pas modifier significativement la résistance du béton à la traction, à la compression et à la flexion (Siddique et Noumowe 2008; Siddique, Schutter et al. 2009). Le sable de fonderie doit cependant être dilué pour correspondre aux standards de qualité requis. Légalement, les mêmes prescriptions que dans le cas du sable de décantation s'appliquent. Dans le cadre de l'étude de cas de Genève, le sable de fonderie étudié ne dépasse pas le taux d'impuretés de 2.5 % requis par la loi cantonale (LGD 1999). En ce qui concerne le bilan économique et environnemental, la substitution proposée permet de détourner un flux de la mise en décharge, ce qui réduit les coûts et améliore le bilan environnemental de la filière. Cette solution n'a cependant pas été réalisée dans les études de cas présentées ici. La principale raison est quantitative : la production des entreprises de transformation de métaux à Genève est trop faible pour intéresser un grand acteur de la production de produits minéraux. Au vu de la faible production annuelle romande de sable issu de fonderies, une réflexion devrait être menée à l'échelle intercantonale (NOGA division C23).

4.4.7.4 N° 9.4 – *Mutualisation de traitement et réutilisation du gravier et béton*

En plus des solutions proposées par le groupe de travail Ecomat^{GE} pour la production de béton à base de grave recyclée en début de section, une deuxième piste est envisageable pour diminuer la quantité de déchets inertes. Elle est étroitement liée à la précédente dans ce sens qu'elle propose le concassage des excédents de béton produits par les entités de fabrication de produits minéraux afin de les réintroduire dans le procédé de production. Dans le cas de Genève, le béton excédentaire est actuellement déposé au fond de grands moules trapézoïdaux. Sous cette forme, le flux est valorisé en tant que corps mort pour les ports ou les champs d'entraînement militaire. Il s'agit donc d'une symbiose industrielle pré-existante, aboutissant à la réutilisation des déchets de production de béton (Section 4.2.1.3).

Les normes techniques sont définies au niveau fédéral par la directive sur la valorisation des déchets de chantier minéraux (OFEV et Schenk 2006). Les contraintes techniques et légales à une réutilisation sont clairement identifiées. La législation incite même à la mise en place de telles filières. Selon le schéma de la Figure 63, la confédération définit les utilisations possibles des graves recyclées, facilitant ainsi la mise en œuvre d'une synergie, les aspects économiques étant laissés aux lois du marché. En ce qui concerne

le bilan environnemental, le bénéfice est évident : diminution de l'extraction et de la transformation de ressource, détournement de la mise en décharge et diminution des tonnes-kilomètres parcourues.

4.4.7.5 N° 9.5 – Echanges d'argile cuite

Deux sources de sous-produit d'argile cuite ont été identifiées sur le territoire du canton de Genève. Elles proviennent de la fabrication de produits minéraux, en particulier des tuiles en argile (NOGA division C23) et du traitement de surface métallique dans le secteur du travail des métaux (NOGA division C26).

Dans le secteur de la construction, les sous-produits sont actuellement entreposés sur les sites de production ou envoyés en DCMI. La valorisation des déchets de production comme granulats de tuiles est autorisée par la Directive sur la valorisation des déchets de chantier minéraux (OFEV et Schenk 2006). Les applications possibles sont cependant strictement réglementées et n'autorisent pas leur utilisation dans la fabrication de béton, ni comme sous-couche routière (OFEV et Schenk 2006). Dans le canton de Genève, deux filières de valorisation ont été étudiées en collaboration avec le groupe de travail Ecomat^{GE}. Premièrement, les pouvoirs publics souhaitent tester les caractéristiques d'un béton contenant des débris de tuiles. En cas de succès, ces derniers pourront être intégrés aux flux de déchets de démolition en vue de la production de béton à partir de grave recyclée. En attendant, et selon la norme en vigueur, le gravier non trié peut contenir jusqu'à 20% de tuiles concassées. Cette proposition n'est cependant pas développée dans la Directive fédérale. Deuxièmement, une des applications proposées par la Directive sur la valorisation des déchets de chantier minéraux pour les granulats de tuiles est la valorisation comme matière première pour les aménagements extérieurs, soit dans les jardins et parcs publics, les places de sport et les chemins forestiers. Techniquement, l'utilisation dans les infrastructures sportives requiert un calibrage précis, dans le but de ne pas blesser les utilisateurs. Cette solution est facilitée par le projet de réutilisation des matériaux de construction actuellement en cours dans le canton de Genève. Une fois les plateformes de concassage - calibrage activées, un échantillon de tuiles pourra être préparé et testé sur un terrain de sport. Une autre solution, moins contraignante techniquement, est la valorisation des résidus d'argile sur les chemins forestiers. Techniquement, à l'image du cas des infrastructures sportives, les débris devraient être homologués (calibrés) afin d'éviter tout risque de blessures pour les usagers de ces chemins. Mais dans ce cas, les exigences qualitatives sont moins contraignantes. Une campagne de sensibilisation auprès des entreprises de paysagisme pourrait être envisagée.

Le deuxième flux d'argile cuite détecté dans le cadre du projet pilote de Genève concerne des billes d'argile utilisées pour le polissage de pièces métalliques. Si les mêmes filières de valorisation peuvent être envisagées, la principale contrainte sera, dans ce cas, d'ordre légal, étant donné que les billes usagées peuvent contenir des traces de métaux.

Ces deux solutions sont intéressantes économiquement pour les entreprises concernées car elles leur permettent d'économiser la taxe de mise en décharge. En termes de bilan environnemental, elles permettent une réutilisation des résidus de tuiles.

4.4.7.6 *Synthèse et conclusion*

Les quatre opportunités de symbioses industrielles impliquant des matériaux inertes sont pertinentes dans le contexte suisse romand. Les pouvoirs publics des territoires concernés l'ont d'ailleurs bien compris puisqu'ils tentent depuis plusieurs années de favoriser un usage optimal des ressources à travers la mise en place de nouvelles filières de réutilisation et de recyclage des matériaux inertes. La symbiose n° 9.1 concernant les sables de décantation est fortement recommandée. Les principales contraintes sont le respect des contraintes légales et l'adéquation quantitative. La réutilisation des sables issus du traitement de surfaces (n°9.2) est également pertinente dans les cas où le flux finit actuellement en décharge contrôlée. Il peut être réutilisé pour la production de produits minéraux à base de matériaux recyclés. La symbiose n° 9.3 consiste à incorporer les sables de fonderie dans la production de béton. Elle remplit également toutes les conditions nécessaires. Finalement, deux solutions s'offrent aux résidus d'argile cuite (n° 9.5) qui peuvent être incorporés à une grave à béton ou être valorisés dans des équipements de loisirs.

Ces quatre solutions pourraient faire l'objet d'une solution commune permettant de résoudre le problème lié aux faibles quantités. La création d'un espace centralisé de collecte et de tri de ces trois flux, par exemple au sein d'une gravière équipée pour le concassage et le calibrage pourrait être une solution. A Genève, la réutilisation des graves dans la construction permet de rendre l'usage de la ressource plus durable. Ce processus requiert parfois de pouvoir entreposer les matériaux pendant un certain laps de temps. Le canton de Genève manque de place pour stocker et trier les déchets de démolition. Le prix du terrain est actuellement trop élevé pour permettre à ces activités d'être rentables. L'administration cantonale réfléchit actuellement à la création de zones dédiées à la gestion des matériaux inertes. Ces zones permettraient de créer des espaces de stockage pour les entreprises spécialisées dans ce domaine en maintenant un prix du terrain peu élevé. Il pourrait s'agir d'espaces en attente ou en cours de transformation. Les gravières pourraient également remplir ce rôle.

Problématique plus générale que les pistes précédentes, la symbiose n° 9.4 traite de la mise en place de filières de production de grave recyclée et en particulier de la valorisation des résidus de production. La législation suisse est favorable à cette solution et les pouvoirs publics mènent une politique d'incitation.

4.4.8 Famille n°11 : les matières organiques

Cette famille regroupe les flux de matière organiques d'origine végétale et animale issus de l'ensemble des activités du secteur primaire (NOGA division A1 à A3) et de toutes ses filières de transformation, en particulier l'industrie alimentaire (NOGA division C10) et la production d'énergie (NOGA division D35). Dans le cadre de ce travail, elle traite aussi des déchets organiques et alimentaires issus des activités économiques du secteur secondaire et principalement de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) : produits défectueux, invendus et sous-produits issus des procédés de production. Elle aborde également la problématique des déchets organiques de la restauration (lavures), qui constituent des déchets organiques dits humides dont la capacité à être méthanisés est élevée (Tableau 27). Pour des raisons de limites du système, les déchets de l'agriculture et la biomasse ne sont pas considérés ici. Cette approche essentiellement basée sur la gestion des flux sortants se justifie par l'impossibilité d'utiliser des matières premières secondaires organiques pour la production de biens de consommation destinés à l'alimentation humaine.

La Confédération suisse a publié en 2009 une stratégie pour optimiser la valorisation des déchets de biomasse et de l'industrie agro-alimentaire. Elle se base sur huit principes (OFEN, OFAG et al. 2009) :

1. *La biomasse produite dans le pays contribue largement à la sécurité de l'approvisionnement ;*
2. *La surface nécessaire à la culture de la biomasse, notamment à la production de produits alimentaires est préservée. Il faut éviter les effets d'éviction ;*
3. *La biomasse est produite, transformée et utilisée moyennant un recours optimal aux ressources ;*
4. *La biomasse génère beaucoup de valeur ajoutée grâce à l'utilisation en cascade ;*
5. *La biomasse est utilisée selon le principe du cycle fermé ;*
6. *Les ressources naturelles vitales doivent être préservées ;*
7. *La responsabilité sociale est prise en compte ;*
8. *En cas de développement de la législation, la cohérence avec la stratégie relative à la biomasse est assurée.*

La stratégie précise plusieurs points importants dont il faut tenir compte dans le cadre de la valorisation de la biomasse. Premièrement, elle prône une prise en compte équilibrée des trois piliers du développement durable. Deuxièmement, elle suggère d'améliorer la coordination entre les domaines politiques afin d'améliorer la cohérence entre les nombreux projets en cours sur le territoire suisse. Les deux derniers objectifs ajoutent que la biomasse doit être utilisée en cascade lorsque nécessaire afin de produire une valeur ajoutée maximum et qu'elle doit être entièrement utilisée et restituée au cycle naturel des

substances (OFEN, OFAG et al. 2009). Si la stratégie énoncée par les services de la Confédération concerne principalement les sous-produits de l'agriculture et la biomasse dédiée à la production d'énergie renouvelable, elle s'applique également aux sous-produits des activités économiques du secteur de l'industrie alimentaire.

Les objectifs stratégiques de la Confédération favorisent la production agricole destinée à la nutrition humaine puis aux activités d'engraissement animal. En respect des principes de l'écologie industrielle, le retour de la matière organique dans les cycles naturels doit également être favorisé pour autant que les teneurs maximales en substances polluantes émises par l'Ordonnance sur les atteintes portées au sol (OSol 1998) le permettent. Ensuite, quatre filières principales de valorisation sont envisageables. Il s'agit premièrement de l'incinération avec récupération de l'énergie. Cette solution n'est néanmoins pas optimale. Viennent ensuite trois options qui peuvent être conjuguées : l'utilisation pour l'engraissement des élevages porcins (NOGA division A1), la méthanisation et le compostage. Les déjections issues de l'élevage peuvent ainsi être réutilisées pour la production d'énergie renouvelable (biogaz) et les digestats comme engrais pour l'agriculture. La chaleur obtenue lors de la production d'électricité peut être utilisée pour la production de viande, pour l'industrie, l'artisanat ou pour le chauffage de locaux.

A l'heure actuelle, seule une petite partie est incinérée dans les UIOM des Cheneviers (GE) et de Tridel (VD). Dans le canton de Genève, la majeure partie est actuellement utilisée pour l'engraissement porcin ou transformée en méthane. Cependant, selon l'Office Vétérinaire Fédéral, l'ordonnance concernant l'élimination des sous-produits animaux (OESPA 2004) devra s'adapter à la législation européenne d'ici à 30 juin 2011, qui interdit en effet l'engraissement du bétail avec des lavures⁴⁸. Parallèlement, les matières premières secondaires issues des activités de l'agriculture sont réutilisées pour la production conjointe de biogaz et de compost dans l'installation du Nant de Chatillon. Si ce système peut encore être optimisé, il représente un très bon exemple de valorisation de la ressource biomasse. En particulier, sa capacité globale est trop faible par rapport aux quantités récoltées. Dans le canton de Vaud, une préférence est donnée au compostage.

Plusieurs symbioses industrielles particulièrement efficaces et en phase avec la stratégie fédérale existent déjà dans le canton de Genève (Section 4.2.1.4). Cependant, la nécessité d'augmenter la part des énergies renouvelables induit une forte demande en sous-produits de matières organiques. Les petites installations de compostage et de méthanisation se multiplient et entrent en compétition avec la valorisation des sous-produits pour l'alimentation humaine et dans le secteur de l'agriculture. Les UIOM et les chaudières communales renforcent encore cette situation en cherchant à assurer leur approvisionnement en matière première.

⁴⁷http://www.biomasseenergie.ch/FR_Home/News/tabid/499/articleType/ArchiveView/month/4/year/2009/language/fr-CH/Default.aspx

Plusieurs flux de matière organiques ont été identifiés dans les études de cas de Genève et de Lausanne Région (Tableau 27).

Tableau 27 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 11 : matières organiques. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
11.1	Résidus de production	Sous-produit	G	47	-	-	Symbiose pré-existante	Réutilisation	Alimentation animale	A	1	Sous-cyclage
			C	10	A	1	Echange	Réutilisation	Inconnu	E	38	Sous-cyclage
11.2	Lactosérum (doux et acide)	Sous-produit	C	10	-	-	Symbiose pré-existante	Réutilisation	Alimentation animale	A	1	Sous-cyclage
11.3	Herbes aromatiques séchées	Sous-produit	C	20	A	1	Echange mis en place	Réutilisation	Production de chaleur	D	35	Valorisation énergétique

4.4.8.1 N° 11.1 – Echanges des résidus de production

Les procédés de production de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) génèrent des sous-produits organiques et non-organiques. La fraction qui nous intéresse ici est la matière organique sous forme de chutes de production, d'éléments possédant un défaut de fabrication ou de produits invendus dont la date de consommation a expiré. Il s'agit donc de produits finis impropres à la consommation et ne pouvant pas être utilisés pour l'alimentation humaine (Section 4.2.1.4).

Les filières de valorisation les plus courantes aujourd'hui sont la valorisation énergétique (incinération) et dans une moindre mesure le compostage. Une troisième alternative consiste à réutiliser les sous-produits comme matière première pour la fabrication d'aliments pour animaux ou comme engraissement pour l'élevage porcin mais des considérations d'ordre économique limitent le recours à cette solution. La nécessité de séparer les emballages de la matière organique complique en effet le processus et handicape sa rentabilité. Selon les entités économiques concernées, la séparation de la matière organique et de l'emballage rend la filière de valorisation agricole trop coûteuse en main d'œuvre. Cette activité peut néanmoins être financée par l'économie réalisée sur la taxe d'élimination. Sur le plan légal, elle doit respecter les normes sanitaires du secteur agro-alimentaire et les dispositions de l'Ordonnance fédérale sur les épizooties (OFE 1995). En ce qui concerne les aspects environnementaux, une réduction des impacts peut être obtenue en cas de valorisation locale et de retour au cycle naturel par rapport à la

valorisation énergétique. L'engraissement par des sous-produits locaux permet dans certains cas d'éviter l'importation de substances nutritives nécessaires aux élevages.

La plupart des déchets alimentaires sont aujourd'hui déjà valorisés de manière optimale dans le canton de Genève où une faible part seulement est incinérée. Dans le canton de Vaud, la proportion incinérée est plus importante. Il existe donc un potentiel non négligeable pour développer cette filière. Dans le canton de Vaud, la compostière « La Coulette », située à Belmont, prend en charge les déchets alimentaires issus des cuisines des ménages. Si cette alternative ne pouvait fonctionner, l'entreprise Kompogas SA, située à Glattbrugg dans le canton de Zürich et qui fabrique des fertilisants à partir de déchets organiques, devrait être en mesure de prendre en charge les déchets alimentaires. L'éloignement de cette société est en revanche susceptible de poser des problèmes économiques et environnementaux. En conclusion, les résidus de production de l'industrie alimentaire devraient, en respect des principes de l'écologie industrielle et de la stratégie fédérale, être rendus aux cycles naturels par l'intermédiaire de l'alimentation animale et lorsque cela n'est pas possible, être transformés en méthane et en compost.

4.4.8.2 N° 11.2 – *Echanges de lactosérum doux et acide*

Le lactosérum, ou petit lait, est produit exclusivement par l'industrie alimentaire (NOGA division C10) spécialisée dans les activités de transformation du lait. Le lactosérum est la partie liquide issue de la coagulation du lait. Il est créé au cours du procédé de présure lors de la fabrication de fromage. Sa teneur en eau avoisine les 95% mais il contient un fort taux d'éléments nutritionnels comme du lactose, des protéines, des sels minéraux et de la matière grasse. Deux types de lactosérum existent : le sérum doux et le sérum acide. Le premier peut être réutilisé dans l'industrie soit sous forme de poudre ou après filtration pour l'alimentation humaine ou animale, soit sous forme de perméat (produit de l'ultrafiltration) dans l'industrie pharmaceutique. Il peut également être transformé en éthanol par un procédé de fermentation. Celui-ci peut être utilisé dans la chimie de synthèse, comme solvant ou comme carburant. Le deuxième, difficile à traiter, est souvent utilisé directement dans l'alimentation animale. Pour obtenir un mélange assimilable par les animaux, le lactosérum est mélangé à des aliments concentrés contenant de l'orge et du soja. L'utilisation du lactosérum doux (après transformation) et acide comme nutriment pour l'engraissement d'un élevage local de porcs et de veaux semble être la solution optimale. Elle est la plus répandue en Suisse à l'heure actuelle, à l'image de Genève où cette filière constitue une symbiose industrielle pré-existante (Section 4.2.1.4). Une grande entité économique spécialisée dans la transformation de produits laitiers a déjà recours à cette filière.

La course aux énergies renouvelables attire l'attention depuis quelques années sur la méthanisation du lactosérum. Celui-ci, s'il est complété par des apports de déchets organiques d'origine agricole, permet de produire du méthane et des digestats qui peuvent être intégrés à du composte. Légalement, seules les exigences de l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990) et de l'Ordonnance sur l'énergie (OEne 1998) doivent être respectées, car bien entendu le gain environnemental dû à une telle valorisation

n'est pas négligeable : production d'énergie locale et donc réduction de la consommation (et donc des importations) de combustibles fossiles. Cette filière reste néanmoins une forme de valorisation énergétique.

Une pesée des intérêts tend à montrer que le gain environnemental généré par la méthanisation sera dépassé par les impacts engendrés par l'importation de viande ou de nutriments depuis l'étranger. Néanmoins, aucune analyse de cycle de vie complète ne semble disponible à ce jour dans le contexte suisse.

4.4.8.3 N°11.3 – *Echanges de briques d'herbes aromatiques*

Le flux de briques d'herbes aromatiques détecté par le projet pilote de Genève est issu d'une activité spécifique de l'industrie alimentaire (NOGA division C10) consistant à extraire des essences de produits naturels. Ce procédé génère un sous-produit de matière organique sous la forme de briquettes d'herbes aromatiques séchées. Leur valorisation se faisait jusqu'en 2007 dans deux chaufferies communales à bois du canton. Légalement, aucune restriction particulière n'existe pour cette activité de valorisation énergétique. De nombreuses mesures incitent même à produire de l'énergie renouvelable à partir de biomasse. Depuis 2007, plus de 200 tonnes par an, conditionnées en briquettes de 10 cm par 10 cm ont été détournées de la valorisation énergétique pour être utilisées comme litière pour bovin et amendement organique. L'entité productrice a été informée des possibilités de valorisation dans le cadre des actions du groupe de travail Ecosite. Les modalités de mise en œuvre de la symbiose ont été discutées directement par les deux acteurs, avec l'aide de AgriGenève, association faîtière de l'agriculture genevoise (Section 4.2.1.4).

4.4.8.4 *Synthèse et conclusion*

De manière générale, les symbioses industrielles concernant les matières organiques suscitent beaucoup d'intérêt à l'heure actuelle. La stratégie 2009 de la Confédération dans ce domaine constitue la base des réflexions présentées dans les sous-sections précédentes (OFEN, OFAG et al. 2009). En suivant les principes de l'écologie industrielle et les objectifs stratégiques de la confédération, une préférence est donnée, lorsque les conditions sanitaires le permettent, à l'alimentation humaine puis à la valorisation dans les activités liées à l'agriculture comme l'engraissement animal. Ainsi, la symbiose industrielle n° 11.1, concernant les résidus de production de l'industrie agro-alimentaire, possède un potentiel non négligeable, malgré les contraintes techniques liées au conditionnement. Les synergies n°11.2 et 11.3, qui proposent toutes les deux des solutions permettant de réintroduire la matière organique dans les cycles naturels grâce à l'épandage ou à la nutrition animale sont fortement recommandées. Lorsqu'une matière première secondaire ne peut pas être utilisée par l'être humain et les animaux, il est possible de recourir à la méthanisation, couplée à une production de compost.

Dans le cas de Genève, la valorisation des déchets organiques doit encore être améliorée afin d'éviter une surcharge des infrastructures cantonales de méthanisation et de compostage et de devoir exporter une partie du tonnage collecté. Les objectifs du Plan de gestion des déchets du canton de Genève 2009-2012 (GESDEC 2009) sont en phase avec ce constat et permettront à court terme d'exploiter les déchets organiques de manière optimale. En revanche, les lavures vont prochainement changer de filière d'élimination et il conviendrait d'étudier les implications en termes structurels sur la filière porcine.

4.4.9 Famille n°13 : les objets et substances fonctionnels

La famille 13 regroupe un certains nombres d'objets ayant des fonctions spécifiques liées au conditionnement dans le cadre d'activités économiques variées. Il s'agit de palettes en bois, de sacs en matière plastique de grandes tailles (bigbags) et de fûts métalliques utilisés pour le conditionnement et le transport de matière première, de produits finis ou de déchets (Tableau 28).

Environ 70% des entités économiques des études de cas de Genève et de Lausanne Région utilisent des palettes en bois, en majorité pour leur approvisionnement. Les bigbags sont utilisés uniquement par certaines activités comme la production de produits minéraux (NOGA division C23), le traitement de l'eau (NOGA division E36) et l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21). Les fûts métalliques ont été étudiés en lien avec les activités d'impression (NOGA division C18) et l'industrie chimique (NOGA division C20). Il existe de nombreux autres flux de matière liés aux procédés de conditionnement de produits finis ou intermédiaires. Les flux cités précédemment sont cependant les principaux détectés dans les deux études de cas.

L'intérêt de considérer la fonction d'un objet ou d'une substance et non le ou les matériaux qui le compose, comme c'est le cas pour les autres familles de flux, provient de l'utilisation spécifique qui en est faite dans l'industrie. Adoue (Adoue 2004) écrivait dans les recommandations de sa thèse qu'il serait plus pertinent de traiter l'ensemble des flux de matière et d'énergie sous l'angle de leur fonction dans l'industrie, plutôt que de leur composition. En effet, de nombreuses substances peuvent remplir une même fonction. Les paramètres techniques et économiques de leur utilisation ne sont cependant pas équivalents, de même que leurs impacts environnementaux. Cependant, l'établissement d'une nomenclature complète des fonctions est une tâche complexe à cause de la diversité des activités considérées. Dans le cadre de ce travail, seuls les flux de conditionnement sont considérés sous cet angle et analysés en fonction de la faisabilité et la pertinence d'une réutilisation.

Nous verrons dans les sections suivantes que le principal problème inhérent à la réutilisation d'un flux de conditionnement est le nettoyage. Le flux ne doit pas être transformé étant donné qu'il est valorisé pour sa fonction de contenant. Les contraintes à la mise en œuvre de symbioses industrielles sont donc principalement d'autre technique (sanitaire et risque) et économique (prix du processus de nettoyage).

Tableau 28 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 13 : objets et substances fonctionnels. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
13.1	Palettes en bois	co-produit	-	-	E	38	Mutualisation de traitement	Réutilisation / création d'activité	Conditionnement / Production de chaleur	D	35	Réutilisation / Valorisation énergétique
13.2	Bigbags (plastique)	co-produit	C	23	G	45	Echange	Réutilisation	Production de chaleur	D	35	Valorisation énergétique
			E	36	F	42						
			C	21	C	10						
13.3	Fûts	co-produit	C	18	C	20	Echange	Réutilisation	DCB	E	38	Mise en décharge

4.4.9.1 N° 13.1 – Mutualisation de traitement des palettes en bois

La matière première et les produits intermédiaires sont souvent conditionnés par palettes lors de leur livraison à une entreprise. A l'heure actuelle, de nombreuses entités économiques les réutilisent pour conditionner leur propres produits finis ou intermédiaires. De nombreuses entreprises ont également des accords avec leurs fournisseurs qui viennent reprendre les palettes non utilisées afin de les réutiliser. L'usage cyclique est possible jusqu'au moment où celles-ci sont abimées et ne permettent plus une manipulation sûre et efficace. Les palettes en fin de vie ont pendant longtemps été valorisées énergétiquement. Les UIOM sont privilégiés car les palettes en fin de vie sont la plupart du temps imprégnées de diverses substances et ces installations permettent de respecter les normes fixées par l'Ordonnance sur la protection de l'air (OPair 1985). Au sens de la législation suisse, les palettes s'apparentent en effet à du bois traité ou souillé (Section 4.4.2). Il faut encore signaler que de petites quantités sont utilisées par les pompiers pour des feux d'entraînement. Une autre partie, par l'intermédiaire de l'entreprise de collecte Serbeco SA, est envoyée en Italie pour la fabrication de panneaux d'aggloméré utilisés dans le secteur de la construction.

La première idée qui a émergé dans le cadre du projet pilote de Genève (Adoue 2005) était de créer une activité de réparation des palettes en bois encore utilisables afin de les réinjecter sur le marché en tant que produits de conditionnement recyclés. Dans le cas d'une palette trop abimée, il était également envisagé de la démonter pour en récupérer la matière première, le bois, en vue de le réutiliser. Une étude plus approfondie de la situation en Suisse romande a révélé que la première filière existait déjà. Depuis octobre 2005, l'entreprise Serbeco SA a créé une filiale, Swiss Palettes SA, aujourd'hui indépendante, spécialisée dans la collecte, le tri, la réparation et la remise dans le circuit des palettes usagées. Ses ateliers se situent dans le canton de Vaud. Deux autres entreprises, Récupération

Chablaisienne Recyclage (Vétraz Monthoux, France) et Ecocube, également située dans le canton de Vaud, possèdent une part importante du marché romand. Les activités de ces trois entités s'apparentent à du recyclage ou, plus précisément, à une activité de processeur de matériaux (NOGA division E38). En analysant ces activités sous l'angle des symbioses industrielles, il n'est pas possible de parler ici de mutualisation de collecte et de traitement étant donné que les entités économiques qui font appel à ce service n'en sont pas partenaires et que la collecte est rarement mutualisée.

Techniquement, l'activité fonctionne puisque plus de 75% des palettes peuvent être remises en état et réintroduites sur le marché. La faisabilité technique dépend évidemment du modèle de palette et de son état. Lorsqu'une palette est trop abîmée ou souillée, elle est incinérée. Le bilan économique de ces activités est également positif. Ces entités ont réussi à mettre en place un modèle rentable malgré la faible valeur marchande des palettes usagées. La marge bénéficiaire est faible.

Le cas des palettes en bois prouve que certaines filières d'entretien et de réparation peuvent représenter un optimum environnemental. Il s'agit d'un modèle économique différent de celui de la mutualisation de collecte et de traitement proposé par l'écologie industrielle, mais qui remplit le même objectif : la réutilisation des produits en fin de vie. L'étape suivante pourrait consister en la fédération des entités économiques actives sur ce marché dans le but de favoriser la mutualisation des transports. Selon les professionnels de la branche, une telle solution n'est pas envisageable à l'heure actuelle.

4.4.9.2 N° 13.2 – *Echanges de bigbags*

Les bigbags sont de grands sacs en polypropylène de 0.5 à 1m³ utilisés pour le conditionnement de différentes matières premières et de produits finis. De nombreux secteurs d'activité en reçoivent dans le cadre de leur approvisionnement et en utilisent pour stocker des déchets. Le secteur de la construction (NOGA division C23), par exemple, en utilise pour transporter des matériaux de construction sur les chantiers et évacuer les déchets de démolition. Les installations de traitement des eaux (NOGA division E36), l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21), l'industrie alimentaire (NOGA division C10), ainsi que le secteur primaire de l'agriculture (NOGA division A1) en utilisent pour le stockage de matières premières ou de produits intermédiaires. Certaines entités les réutilisent plusieurs fois à l'interne ou s'en servent pour l'évacuation des déchets.

La plupart du temps, les bigbags terminent leur vie dans les UIOM. Légalement, l'Ordonnance sur les Mouvements de Déchets (OMoD 2005) exige que les sacs ayant contenu des substances dangereuses soient incinérés. Ils sont alors eux-mêmes considérés comme des déchets spéciaux. C'est le cas des bigbags rejetés par l'activité de collecte et traitement des eaux (NOGA division E36). Plusieurs centaines de sacs par an sortent souillés par du polyacrylamide, un flocculant. Leur élimination doit donc se faire en accord avec l'OMoD. Dans ce cas, la symbiose n'est donc techniquement (qualitativement) pas réalisable. De par la faible valeur ajoutée du sous-produit, il n'est pas envisageable de mettre en place une adaptation qualitative.

Cependant, des échanges peuvent être mis en place entre les entités concernées si les bigbags ne sont pas souillés. Dans les secteurs de la production de produit minéraux (NOGA division C23), le génie civil (NOGA division F42), aucune autorisation n'est nécessaire. Un potentiel existe également pour une réutilisation par les garages automobiles (NOGA division G45) pour la protection des véhicules lors de travaux d'entretien ou l'emballage des pneus de saison afin d'en faciliter le transport et le stockage.

Cependant, en ce qui concerne le bilan économique, la valeur ajoutée des bigbags reste faible. De plus, dans le cas où un procédé intermédiaire de nettoyage est nécessaire, la rentabilité de l'échange pourra difficilement être assurée. La marge bénéficiaire est constituée d'une part de la taxe d'incinération, économisée par l'entité productrice, additionnée du prix d'achat d'un bigbag neuf par l'entité utilisatrice.

Dans le cas de Genève, l'Union genevoise des carrossiers, ainsi que l'Union professionnelle suisse de l'automobile reconnaissent que la filière est intéressante. Elles mettent néanmoins en avant un intérêt économique faible et un risque de contamination accidentelle non négligeable. La deuxième solution énoncée précédemment et qui consiste à réutiliser les bigbags pour le conditionnement et le transport de déchets inertes de chantiers est moins sensible au risque sanitaire. Techniquement, les sacs sont a priori suffisamment résistants pour cet usage.

4.4.9.3 N°13.3 – *Echanges de fûts métalliques*

Dans le cadre du projet pilote de Lausanne, deux entités économiques des secteurs de l'impression (NOGA division C18) et de l'industrie chimique (NOGA division C20) utilisent des fûts métalliques de 200 litres pour leur approvisionnement et le stockage de matières premières, de produits intermédiaires et dans le cas de l'industrie chimique, de déchets spéciaux. Ces fûts sont actuellement repris par une entité de recyclage située dans le canton de Vaud et semblent finir leur vie dans une décharge contrôlée bioactive ou dans une filière de recyclage des métaux, à l'étranger. Dans le cas de Genève, une entreprise du secteur de l'industrie chimique (NOGA division C20) utilise des fûts du même type. Après utilisation, ils sont compressés et envoyés en filière de recyclage des métaux.

La mise en place d'une symbiose industrielle permettant une réutilisation en substitution de fûts neufs apparaît comme une solution intéressante. Techniquement, le dégazage et le lavage des fûts sont envisageables. Le coût du traitement sera cependant élevé. Légalement, les fûts servant au stockage des produits dangereux sont de toute façon soumis à la Loi fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses (LChim 2000) et l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005). Cela implique que les coûts d'élimination sont pris en charge par l'entreprise utilisatrice.

Le principal obstacle à la mise en place d'une telle filière est d'ordre contractuel. En effet, les industriels consultés nous ont indiqué que leurs services juridiques n'étaient pas favorables à cette solution. En effet, le risque lié à l'utilisation de fûts usagés et nettoyés est trop important. En cas d'accident, la responsabilité sera imputée à l'entreprise à l'origine de la réutilisation. Pour cette raison, aucun échange n'a encore été mis en place dans ce domaine.

Le gain environnemental de cet échange n'est pas significatif par rapport aux impacts globaux des secteurs concernés. Cependant, il représente quand même une économie de flux de conditionnement substantielle en ajoutant une ou plusieurs utilisations dans le cycle de vie des fûts.

4.4.9.4 *Synthèse et conclusion*

La réutilisation de flux de conditionnement entre entités économiques présente plusieurs difficultés. Premièrement, la faible valeur économique des flux permet rarement la mise en place d'un procédé intermédiaire de nettoyage. Deuxièmement, les flux ne doivent pas être souillés de substances dangereuses, sans quoi, même en cas de nettoyage, le risque lié à la réutilisation est trop élevé. Les symbioses industrielles potentielles concernant les bigbags (n° 13.2) et les fûts métalliques (n°13.3) sont exposées à ces contraintes techniques et légales. La réutilisation des fûts métalliques semble néanmoins avoir une chance plus importante de voir le jour grâce à une valeur économique supérieure et à une utilisation possible pour le stockage des déchets dangereux.

Finalement, la réutilisation de palettes en bois (n° 13.1) existe déjà à large échelle en Suisse romande. Cela confirme sa faisabilité et sa pertinence.

4.4.10 Famille n°15 : les plastiques et les caoutchoucs

Cette famille regroupe les flux de plastiques et de caoutchoucs. Les plastiques sont des composés organiques constitués de macromolécules. Leur nom dépend de leur structure chimique. Le polyéthylène téréphtalate (PET), qui fait l'objet d'une collecte sélective, le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polychlorure de vinyle (PVC), le polystyrène (PS), le polystyrène expansé (PSE) et l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) sont les plus utilisés au sein des activités économiques en Suisse. Ils peuvent avoir des formes, des propriétés physiques et des fonctions différentes : films, emballages et contenants souples ou rigides, résines plastiques, tuyaux et éléments de réseau ou de construction, etc.

Les bouteilles en PET provenant des entreprises sont collectées par la société PET recycling Suisse qui les trie et les achemine jusqu'aux recycleurs situés en Suisse allemande (Zürich, Thurgovie). Le PET collecté se recycle à hauteur de 94 % tandis que la fraction restante est exportée vers la France ou l'Italie. La matière est ainsi recyclée pour produire des pellets. Ils sont ensuite utilisés à hauteur de 40 à 50 % pour produire de nouvelles bouteilles, le reste étant valorisé pour la production d'emballages, de fibres ou de rembourrages pour vêtements.

L'existence d'une telle filière est cependant limitée au PET. La majeure partie des plastiques mélangés collectés dans les entreprises est incinérée dans les UIOM. Lorsqu'ils sont collectés séparément, le PP et le PE sont triés, pressés et broyés selon les qualités requises. Ils sont ensuite envoyés soit à InnoPlastics (Thurgovie) qui en valorise la majeure partie, soit à l'étranger (Asie). InnoPlastics produit des granulats de plastique qui sont ensuite utilisés comme matière première pour les marchés suisse et européen. Parallèlement, les filières pour le recyclage du PVC sont très peu développées et cette fraction finit dans les UIOM. Certains types de plastiques comme le polystyrène (PS) expansé ou extrudé sont également triés avec des exigences élevées et valorisés pour produire des plaques d'isolants chez Luxit Isolations SA (Fribourg). Mais cette filière de sous-cyclage ne peut absorber qu'une partie réduite des déchets de PS car les installations de broyage limitent les qualités de déchets visés. Il reste que le marché national absorbe relativement bien ce produit comme isolant de toiture.

Cette famille de flux inclut également les caoutchoucs, à savoir les pneumatiques et, en lien avec les activités auditées, les blanchets issus des activités d'impression (NOGA division C18). Les pneumatiques collectés semblent finir majoritairement leur vie dans les fours de cimenteries. Une partie est néanmoins triée au préalable afin d'être revendue à l'étranger. Une fraction des pneus usagés est néanmoins reprise par Jean-Bernard Frassa en Valais. Celui-ci exporte les pneus usagés encore valables pour une réutilisation directe à l'étranger, trie la partie qui peut être rechapée dans les usines spécialisées en Europe, envoie à Holcim les pneus non recyclables (du fait de la taille ou de la composition en textile) et déchiquète quasiment tout le reste pour récupérer les fractions d'acier (paille), de caoutchoucs et de tissus. L'installation de granulation dont dispose la société est unique en Suisse. La paille d'acier (20% du poids) est envoyée en aciérie (UE, Suisse). Le caoutchouc est broyé en granulés de différentes tailles

allant de 1 à 16 mm pour être réutilisé en tant que matière première pour la production d'isolants, de tapis, de surfaces pour terrains de jeux et sportives. Une filière d'incorporation dans des produits minéraux existe déjà dans certains pays, en particulier dans certains types de béton (Amari, Themelis et al. 1999; Siddique et Naik 2004; Sukontasukkul 2009; Yilmaz et Degirmenci 2009). En 2010, l'entreprise de Frassa et Fils SA était toujours en fonctionnement malgré une situation de liquidation précisée dans le registre du commerce.

Dans certains pays, la réutilisation directe des pneus usagés, bien que peu documentée, existe. Les principales utilisations sont les aménagements de parcs publics, la protection des coques des bateaux dans les ports ou l'aménagement de conduites dans les décharges ⁴⁹. La demande est cependant largement inférieure à l'offre des pneus usagés.

Toute symbiose industrielle concernant les plastiques et les caoutchouc doit en effet s'effectuer en tenant compte de l'interdiction du sous-cyclage mentionnée dans la Loi de protection de l'environnement (LPE 1983) et en accord avec les exigences de l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990), de l'Ordonnance sur les Mouvements de Déchets (OMoD 2005) lorsque les plastiques et les caoutchoucs sont souillés et de l'Ordonnance pour la protection de l'air (OPair 1985) en cas de valorisation énergétique. Dans les cas de Genève et de Lausanne Région, seul un flux de matière plastique semble pouvoir faire l'objet d'une symbiose industrielle à proprement parler. Il s'agit des blanchets d'imprimerie, un produit résiduel issu des activités d'impression de revue, de journaux et de livres (NOGA division C18) (Tableau 29).

Tableau 29 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 15 : plastiques et caoutchoucs. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
15.1	Blanchets d'imprimerie	produit résiduel	C	18	C	23	Echange	Sous-cyclage	Cimenterie	C	23	Valorisation énergétique
									Thévenaz-Leduc SA	E	38	Inconnu

⁴⁹ <http://www.nisp.org.uk>, site consulté le 12 février 2009.

4.4.10.1 N° 15.1 – Echanges de blanchets d'imprimerie

Dans le cadre des études de cas de Genève et de Vaud, des flux de blanchets d'imprimerie, une toile très fine de caoutchouc servant à déposer l'encre *off-set* sur le papier, ont été identifiés comme potentiellement intéressants pour la mise en place d'une symbiose industrielle. A l'heure actuelle, la majorité est valorisée énergétiquement en cimenterie. Si cette filière est considérée comme une forme de symbiose industrielle pré-existante (Section 4.3.1), il s'agit une nouvelle fois d'une valorisation énergétique.

La solution imaginée au début du projet pilote de Genève (Adoue 2005) propose de valoriser les blanchets d'imprimerie comme additif au bitume pour la fabrication de béton bitumineux dans le secteur de la production de produits minéraux non métalliques (NOGA division C23). Aucune littérature scientifique n'a été trouvée sur le sujet. La faisabilité technique dépend de la capacité de l'entreprise à adapter son procédé de fabrication à ce déchet. Le procédé de production du bitume qui autorise l'ajout de caoutchouc est appelé production « à chaud ». En cas de production dite « à froid » l'ajout n'est techniquement pas possible. En cas d'intégration au bitume, les blanchets se retrouveront dilués dans le béton. Aucun test n'a été effectué à ce jour pour déterminer si la combustion des blanchets dans le procédé de production à chaud permet l'élimination des substances polluantes. Si ce n'est pas le cas, l'utilisation des blanchets dans le bitume constituerait une forme de sous-cyclage pouvant résulter en une diffusion de substances polluantes dans l'environnement. En effet, les blanchets sont souillés par des encres et donc considérés comme déchets spéciaux au sens de l'Ordonnance sur les Mouvements de Déchets (OMoD 2005). Leur incinération est recommandée. Légalement, la réutilisation des blanchets paraît difficilement justifiable. La faisabilité légale constitue ici un élément éliminatoire et ce à juste titre, car en ce qui concerne les impacts sur l'environnement, la menace de diffusion de substances polluantes dans l'environnement représente un risque trop important en l'état des connaissances. Cette symbiose industrielle n'a donc pas abouti à l'heure actuelle. La prochaine étape devrait être une consultation des acteurs économiques de la production de produits bitumineux.

4.4.10.2 Synthèse et conclusion

La réutilisation des blanchets d'imprimerie (n°15.1) par le secteur de la production de produits minéraux est compromise par le risque de diffusion de substances polluantes dans l'environnement.

L'analyse des filières de valorisation des plastiques existantes en Suisse permet d'émettre un certain nombre de recommandations. Premièrement, en ce qui concerne les plastiques mélangés, les fractions de PP et PE suivent déjà aujourd'hui les filières de recyclage les plus intéressantes économiquement, même si les déchets de plastiques sont parfois exportés jusqu'en Asie. Pour les fractions de plastiques non recyclées comme le PS, le développement de filières de sous-cyclage à l'image de Luxit isolations SA pourrait être envisagé. Cette filière est prometteuse, mais la technologie doit encore être améliorée pour ce type de plastique.

Deuxièmement, le recyclage du PVC devrait être privilégié plutôt que son incinération. En effet, non seulement le recyclage est techniquement réalisable, mais en plus il est déjà pratiqué dans d'autres pays européens⁵⁰. La collecte par le biais de sacs de récolte proposés à la vente et récoltés gratuitement peut faciliter le tri et le recyclage. Ce système, aussi appelé « Poly-Sack »⁵¹, a fait ses preuves dans la récolte des films plastiques utilisés en grandes quantités dans l'agriculture. L'entreprise RE-LOG SA propose également ce service pour la récupération dans toute la Suisse des déchets de PE, PP, PS et PSE issus de l'agriculture, de l'industrie et de l'artisanat ainsi que pour les PME. Le système est basé sur l'achat de sacs de volumes différents pour la récolte de certains types de plastiques. Le coût des sacs, inférieur au prix de l'incinération, comprend également la collecte par le repreneur. Les sacs pleins sont ensuite acheminés vers les usines de recyclage.

Troisièmement, à défaut d'opter pour le recyclage des pneus, de nombreux exemples de réutilisation des pneus en fin de vie existent en Europe et pourraient être développés en Suisse. Les pneus peuvent en effet être réutilisés pour faire des murs anti-avalanches ou anti-chutes de pierre, pour des sous-couches de routes en tant que remblais de stabilisation, ou encore en tant que remblais pour la réhabilitation des carrières⁵². Le sous-cyclage des pneus se pratique également par leur broyage en rognures ensuite utilisées pour la fabrication de liants bitumineux à chaud, comme dans le cas imaginé pour les blanchets d'imprimerie, pour le remplissage des bassins de rétention des eaux ou encore comme matériel de drainage dans des tranchées d'évacuation des eaux pluviales. Les bandes de roulement découpées des flancs des pneus peuvent également être utilisées comme tapis ferroviaires ou de tramways entre le béton et le gravier afin de réduire le bruit et les vibrations⁵³. En conclusion, il existe de multiples solutions plus intéressantes que l'utilisation comme combustible en cimenterie pour autant que l'interdiction du sous-cyclage ne soit pas enfreinte.

⁵⁰ <http://fr.recovinyl.com/pvc>, site consulté le 15 septembre 2009.

⁵¹ <http://www.re-log.ch/french/index.php>, site consulté le 15 septembre 2009.

⁵² Les pneus usagés sont des déchets combustibles soumis à contrôle. Ils peuvent néanmoins être valorisés autrement que par la combustion pour autant que cela soit de manière respectueuse de l'environnement.

⁵³ <http://www.aliapur.fr/modules/movie/scenes/home/index.php?fuseAction=page&rubric=valorisation&article=valorisationIntro>, site consulté le 15 septembre 2009.

4.4.11 Famille n°16 : les produits chimiques

Un produit chimique est une solution contenant un ou plusieurs composés chimiques de nature organique ou inorganique. Les industries chimique (NOGA division C20) et pharmaceutique (NOGA division C21) sont d'importants producteurs et transformateurs de produits, utilisés ensuite par toutes les activités primaires, secondaires et tertiaires. En Suisse, les plus fréquents sont les acides, les bases, les composés organiques et inorganiques, les corps purs, ainsi que les solvants organiques et inorganiques. En particulier, les secteurs de la production de produits métalliques (NOGA division C25), de machines et d'équipements (NOGA division C28) et informatiques, électroniques et optiques (NOGA division C26) ont été identifiés comme des consommateurs réguliers d'acides, de bases et de solvants. Les deux premiers sont utilisés essentiellement pour modifier l'équilibre acido-basique d'une solution, alors que les solvants sont utilisés pour extraire les principes actifs de certaines substances, pour la fabrication de produits (par exemple des détergents), ainsi que pour le dégraissage et le nettoyage des installations ou de certains produits intermédiaires. Le secteur de la recherche et du développement (NOGA division M72) est un cas particulier. Il utilise un grand nombre de produits chimiques mais en faibles quantités. Finalement, les audits réalisés ont mis en évidence une forte consommation de produits chimiques par les stations d'épuration des eaux (NOGA division E37). Les procédés de traitement nécessitent des acides et des bases pour la neutralisation et des flocculants pour la décantation. Certains produits sont également utilisés comme nutriments pour les bactéries dans les procédés de dénitrification par exemple.

Depuis le 1 juin 2007, le règlement sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques (REACH) est entré en vigueur dans l'Union Européenne. Son objectif est de protéger de manière plus efficace la santé humaine et l'environnement en responsabilisant l'industrie. Toute entreprise a la charge d'évaluer et de gérer les risques liés aux produits chimiques qu'elle fabrique et aux nouveaux produits introduits sur le marché⁵⁴. Si cette réglementation ne s'applique pas à la Suisse, elle touche néanmoins les entreprises suisses qui fabriquent des produits chimiques dans l'UE ou qui en exportent à destination de son territoire. REACH ne concerne pas les déchets de produits chimiques. Leur collecte et leur traitement forment un marché très compétitif à l'échelle européenne. En Suisse, le principe du pollueur-payeur, instauré par la Loi de protection de l'environnement (LPE 1983), oblige les entités économiques à assumer les coûts de traitement des produits chimiques usagés. La complexité technique du traitement de certains sous-produits et produits résiduels en fait un marché lucratif. Les produits chimiques étant considérés comme des déchets spéciaux, ils sont soumis aux prescriptions des textes de loi comme l'Ordonnance sur les produits chimiques (OChim 2005), l'Ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim 2005), l'Ordonnance sur les accidents majeurs (OPAM

⁵⁴ <http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/chemicals/reach>, site consulté le 17 octobre 2009.

1991), l'Ordonnance sur le traitement des déchets (OTD 1990) et l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005).

Les études de cas de Genève et de Lausanne Région ont permis de mettre en lumière un certain nombre d'opportunités de réutilisation ou d'optimisation de la valorisation des produits chimiques. Du point de vue environnemental, la régénération et la réutilisation des produits chimiques sont intéressantes car elles permettent de diminuer les émissions polluantes dues à la production et l'importation de produits neufs et à l'élimination de produits usagés. La substitution de produits neufs par des produits usagés présente plusieurs opportunités intéressantes, en particulier dans le domaine du traitement des eaux usées. Néanmoins, cela implique de caractériser avec exactitude la composition des flux en laboratoire et de mettre en place une procédure de suivi. Si le risque généré par ces échanges est indéniable, il existe certaines exceptions où la composition du déchet est suffisamment bien connue pour que la substitution puisse s'effectuer sans risque. Comme nous le verrons dans les sections suivantes, techniquement et légalement, la prudence est de mise. Les sections suivantes se concentrent sur les solvants, ainsi que sur les acides et les bases (Tableau 30).

Tableau 30 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 16 : produits chimiques. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
16.1	Les solvants	Sous-produit	C	21	E	38	Mutualisation de collecte et de traitement	Réutilisation ou régénération	Incinération	C	23	Valorisation énergétique
16.2	Méthanol	Sous-produit	C	20	E	36	Echange	Sous-cyclage	CTDS	E	38	Incinération
16.3	Toluène	Sous-produit	C	20	E	38	Mutualisation de collecte	Réutilisation ou recyclage	CTDS	E	38	Incinération
			C	21								
16.4	Ethylene glycol	Sous-produit	C	21	C	20	Echange	Réutilisation ou recyclage	Cimenterie	E	38	Valorisation énergétique
16.5	Acide phosphorique & sulfurique	Sous-produit	C	20	E	36	Echange	Sous-cyclage	UIOM	E	38	Valorisation énergétique
16.6	Hydruure de polyméthylsiloxane	Sous-produit	C	20	C	23	Echange	Sous-cyclage	UIOM	E	38	Valorisation énergétique

4.4.11.1 N° 16.1 – Mutualisation de collecte et de traitement des solvants

Dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région, sept secteurs d'activité utilisent des solvants dans leurs processus de production : l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21), l'industrie chimique (NOGA division C20), le secteur de la reproduction et de l'impression (NOGA division C18), celui de la fabrication de machines et d'équipements (NOGA division C25 et C28), le secteur de fabrication de produits informatiques et électroniques (NOGA division C26) et enfin celui du commerce et de la réparation de véhicules (NOGA division G45) (Figure 65).

A l'heure actuelle, en raison du pouvoir calorifique élevé de la plupart des solvants usagés, l'incinération constitue la principale filière d'élimination. Elle permet de produire de l'électricité et de la chaleur et se pratique en cimenterie, en UIOM ou dans des fours spécialement conçus pour les déchets spéciaux comme Valorec à Bâle.

A Genève, le four rotatif du CTDS qui incinérât les solvants jusqu'en 2007 n'était pas équipé d'installation de récupération de chaleur. Cette installation est aujourd'hui fermée, mais CTDS SA possède les équipements nécessaires pour transférer directement certains solvants à l'UIOM des Cheneviers. Cette solution a l'avantage de présenter un double bénéfice, environnemental et économique. De par son pouvoir calorifique élevé, une tonne de solvants permet de produire une grande quantité de chaleur et d'électricité pouvant être valorisée localement. Au final, une telle solution profite non seulement à CTDS SA, mais également à la production d'énergie dite renouvelable sur le territoire du canton de Genève. Dans le canton de Vaud, la filière la plus importante est la valorisation énergétique en cimenterie, par l'intermédiaire de l'entreprise Cridec. Les solvants qui quittent ces territoires suivent principalement la filière de l'incinération à haute température avec comme intermédiaire Altola AG à Berne et SOVAG Obfelden à Zürich. A l'heure actuelle, SOVAG (Veolia) disposent de voies d'élimination multiples qui dépendent de la qualité des déchets : distillation ou incinération à haute température chez Valorec à Bâle, utilisation en tant que carburant de substitution dans les cimenteries suisses. Altola AG en oriente également une partie vers les cimenteries. Finalement, une fraction minoritaire traverse la frontière française en direction du secteur de la chimie de Lyon et de Teris à Salaise-sur-Seine (Rhône-Alpes, France). Tredi-Séché situé à Saint-Vulbas en France collecte également des solvants usagés pour les régénérer.

Dans le but d'évaluer les meilleures options de traitement du point de vue environnemental pour les solvants usagés, l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich a développé un logiciel appelé *Ecosolvent*. Il permet de comparer 45 types de solvants sur la base des technologies de traitement suivantes : la régénération par distillation, l'incinération en four à déchets spéciaux ou en cimenterie ainsi que l'utilisation en STEP (Capello, Hellweg et al. 2007). Ses fonctionnalités sont détaillées dans la Section 3.1.2. Sur les 45 solvants évalués, la distillation constitue la solution la plus efficace pour près d'un tiers d'entre eux, pour autant que la distillation soit conduite sous conditions optimales (taux élevé de récupération, pas d'entraînement et faible taux de reflux) et si un taux de récupération moyen de 71 % est

suffisant. Pour des solvants particuliers ou des mélanges de solvants comme par exemple le méthyl isobutyl cétone ou l'acétonitrile, la distillation constitue l'option optimale dans tous les cas. La régénération des solvants n'est cependant pas économiquement viable lorsque le taux d'impuretés dépasse les 30% en volume. Dans ce cas, tous les solvants sont considérés comme des déchets qui ne peuvent être valorisés que par incinération et valorisation énergétique. C'est le cas en général des solvants issus du nettoyage des peintures, encres et colles et du dégraissage des métaux. Il ne faut néanmoins pas perdre de vue que l'incinération en cimenterie peut également s'avérer une filière performante pour l'éthanol, le méthanol mélangé ou pas, le méthyléthylcétone ou certains solvants organiques génériques.

Ainsi, le bilan environnemental de la valorisation des solvants usagés semble encourager la distillation et l'incinération, en fonction des produits considérés. La contrainte technique majeure réside dans la complexité des mélanges.

Certains secteurs d'activité ont compris qu'ils pouvaient améliorer leur fonctionnement interne : les nouvelles machines-outils des secteurs de la fabrication de machines et d'équipements (NOGA division C25) et de produits informatiques et électroniques (NOGA division C26) sont équipées d'un système de distillation interne. Celui-ci régénère le solvant après chaque utilisation, diminuant ainsi les ajouts de produits neufs et permettant la récupération des particules métalliques qu'il contient. Deux inconnues demeurent à ce jour : la consommation énergétique du procédé de distillation des machines et le taux d'impureté des solvants usagés lorsque les machines sont purgées et nettoyées.

Cette solution n'est cependant pas applicable à tous les secteurs d'activité. Certains des flux de la Figure 65 présentent une teneur en impureté faible et pourraient être valorisés de manière plus efficace. Si une étude approfondie de chaque solvant est nécessaire pour déterminer la meilleure filière de valorisation, il n'existe pas d'installation de régénération en Suisse romande. Une telle installation requiert de grandes quantités de solvant pour être rentable. Les flux détectés dans le cadre des études de cas de Genève et de Lausanne Région sont très insuffisants pour mettre en place une mutualisation de traitement ou pour motiver l'installation d'une entité de recyclage dédiée à la régénération. Selon une recherche effectuée à l'Université de Lausanne, l'ensemble des flux de solvants usagés disponibles en Suisse romande est insuffisant. De plus, il s'agit de petites quantités de qualité très variable, ce qui complique fortement la mise en place de la distillation (Grebler 2007).

En conclusion, la principale contrainte empêchant la mise en place d'une mutualisation de collecte et de régénération de solvants est l'adéquation qualitative, qui handicape la création d'une nouvelle activité. La rentabilité économique de la filière ne pourra pas être assurée.

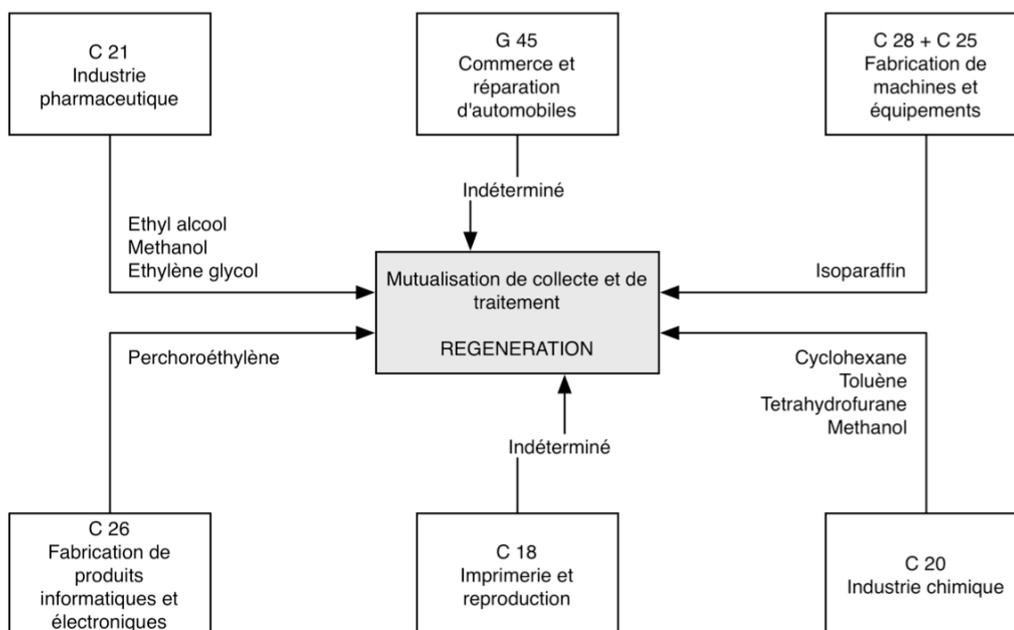


Figure 65 : Flux de solvants usagés dont la régénération pourrait être mutualisée. Source : auteur.

4.4.11.2 N°16.2 – Echanges de méthanol

Le méthanol, ou alcool méthylique (CH_3OH) est un solvant liquide polaire. Il est utilisé dans de nombreux secteurs de l'industrie comme carburant et comme antigel pour circuit de refroidissement. Il entre également dans la production d'autres produits chimiques. Depuis les années 1990, le méthanol est utilisé comme nutriment pour les bactéries dans les procédés de dénitrification installés dans les installations de traitement des eaux. Il est utilisé comme source de carbone (Koch et Siegrist 1997; Peng, Ma et al. 2007; Hagman, Nielsen et al. 2008). En Suisse, l'EAWAG a mené dans ce domaine des recherches liées à la station d'épuration de Zürich-Werdhölzli (Purtschert, Siegrist et al. 1996; Purtschert et Gujer 1999). Réutiliser du méthanol usagé en substitution du produit neuf apparaît dès lors comme une symbiose industrielle intéressante. Pour cet usage, le méthanol doit répondre à des critères de qualité précis, son ajout ne devant pas modifier l'équilibre physico-chimique du procédé de dénitrification.

Les études de cas de Genève et de Lausanne Région, deux entreprises du secteur de la chimie (NOGA division C20) et du secteur de la fabrication de produits électroniques et optiques (NOGA division C26) en utilisaient jusqu'en 2007 pour des procédés de refroidissement. Les deux entités s'approprient cependant à changer le procédé utilisé pour refroidir leurs installations. Les sources détectées ne sont donc pas pérennes. Dans ces cas précis, la disponibilité du flux rend la symbiose impossible. Par contre, si d'autres sources de méthanol existent sur les territoires des cantons de Vaud et Genève, une symbiose industrielle serait techniquement réalisable en fonction du taux d'impureté du flux. Légalement, le méthanol est considéré comme un déchet spécial. La mise en place d'une procédure de suivi, tel que préconisée par l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005), est nécessaire. La faisabilité économique

est assurée d'une part par l'économie réalisée par l'entité productrice pour l'élimination du flux et par celle réalisée par l'entité utilisatrice qui évite d'importer un produit neuf. Cette situation avantageuse permet même le cas échéant de financer la mise en place d'un procédé de filtration ou de purification intermédiaire. La pertinence environnementale peut se justifier à l'aide des mêmes arguments : le flux est réutilisé puis dégradé directement lors du processus de dénitrification des effluents liquides.

4.4.11.3 N° 16.3 – Mutualisation de collecte du toluène

Le toluène, également appelé méthylbenzène ou phénylméthane (C_7H_8) est un hydrocarbure aromatique fréquemment utilisé comme solvant dans l'industrie chimique (NOGA division C20) et pharmaceutique (NOGA division C21). Le toluène est notamment utilisé dans la production de peinture à base de solvant, activité du secteur de l'industrie chimique qui n'existe pas sur les territoires concernés. Le solvant usagé est destiné à la valorisation énergétique en cimenterie par l'intermédiaire de l'entreprise Cridec. Cette solution a été présentée comme une symbiose industrielle pré-existante dans la Section 4.3.1.

Actuellement, deux entités économiques des secteurs de l'industrie chimique et pharmaceutique consomment et rejettent du toluène. Un échange entre entités n'est cependant pas envisageable à cause des contraintes de pureté liées à leur utilisation dans ces domaines. Cependant, il semble possible d'intégrer le toluène usagé, dans la mesure où la teneur en impureté est faible, à la fabrication d'encre recyclée. L'opportunité de création d'une telle activité a été étudiée dans la Section 4.4.5.2, traitant de la problématique des encres et des pigments usagés. La création d'une activité de recyclage de peinture, mentionnée dans la synergie n° 5.1 constitue ainsi une opportunité pour la mutualisation de la collecte et la réutilisation du toluène.

4.4.11.4 N° 16.4 – Echanges d'éthylène glycol

L'éthylène glycol, ou éthan-1,2-diol, est un solvant fréquemment utilisé comme antigel ou réfrigérant par de nombreux secteurs d'activité. C'est également un sous-produit de l'industrie chimique (NOGA division C20) qui l'utilise pour la production de plastiques, comme le polyéthylène téréphtalate (PET). Une entité du secteur pharmaceutique dans la région de Lausanne (NOGA division C21) en rejette chaque année environ 10'000 litres. Comme de nombreux autres solvants, il suit la filière de valorisation comme combustible de substitution en cimenteries. Bien qu'il s'agisse d'une symbiose industrielle pré-existante, une réutilisation de l'éthylène glycol serait préférable à la valorisation énergétique. En fonction de son taux d'impureté, deux solutions sont envisageables.

Premièrement, l'éthylène glycol pourrait être utilisé par la société Biocarb SA (NOGA division G46), localisée à Genève. Il s'agit d'une société spécialisée dans la production de biocarburant. Il semble que l'éthylène glycol puisse être utilisé comme matériau de base à la synthèse de ce type de carburant. Si cette solution s'avère réalisable techniquement et si elle n'accroît pas le risque de diffusion de substances

polluantes dans l'environnement, elle présente un intérêt certain. L'entité productrice évite la valorisation énergétique et les coûts de prise en charge qui l'accompagnent. L'entité utilisatrice, de son côté, développe une nouvelle source d'approvisionnement.

La société Blaser Swissslube SA, localisée à Hasle-Rüegsau, dans le canton de Berne propose une deuxième solution. Il s'agit d'une multinationale qui produit des matériaux lubrifiants (NOGA division C20), principalement spécialisée dans les antigels. L'entité possède sur son site les installations nécessaires à la purification de l'éthylène glycol. Les entreprises productrices pourraient passer un accord avec Blaser Swissslube SA pour le traitement du sous-produit. Cette filière de valorisation devrait permettre soit la réutilisation du produit par l'entité productrice, soit son incorporation dans les processus de production de l'entité utilisatrice comme matière première de substitution. Dans ce cas également, les bénéfices économiques et environnementaux seront supérieurs à ceux de la valorisation énergétique.

4.4.11.5 N° 16.5 – Echanges d'acide phosphorique & sulfurique

Les acides phosphorique (H_3PO_4) et sulfurique (H_2SO_4) sont des flux génériques de l'industrie chimique (NOGA division C20) et pharmaceutique (NOGA division C21). Mais de manière générale, les acides et les bases proviennent principalement de deux secteurs d'activité : la chimie minérale et le travail des métaux.

L'industrie horlogère (NOGA division C26) est une grande consommatrice d'acides pour leur pouvoir décapant. Après utilisation, les acides et bases usagées sont souvent fortement contaminés en métaux lourds et autres substances dangereuses. Ils constituent alors des déchets spéciaux au sens de l'Ordonnance sur les mouvements de déchets (OMoD 2005).

En Suisse romande, les principales filières de valorisation sont l'incinération en UIOM, en cimenterie, ou en four à déchets spéciaux, ainsi que le traitement physico-chimique et la réutilisation. Toutes ces activités se déroulent en Suisse. A Genève, CTDS SA dispose d'une installation pour le traitement physico-chimique pour certaines substances. Après neutralisation avec des produits chimiques du commerce, le produit est dirigé vers la STEP tandis que les boues de filtration vont à la décharge contrôlée d'Oulens dans le canton de Vaud où elles sont stabilisées dans du ciment. De grandes quantités d'acides sont également acheminées en Suisse allemande. Le traitement physico-chimique dans l'unité de traitement de Sibag (Emmenbrücke) valorise ces acides, si la qualité le permet, comme substituts d'intrants chimiques. Dans certains cas, en fonction de la teneur en métaux lourds, les acides peuvent également être valorisés dans des activités de zingueries. Celles-ci réalisent en effet un décapage des surfaces de zinc dans un bain exclusif de manière à ne pas disperser le métal. Les zingueries utilisent également de l'acide chlorhydrique pour le décapage de surfaces en fer. Le sous-produit formé est composé essentiellement de chlorure de fer de grande utilité pour le traitement des eaux ou comme catalyseur. Finalement, l'incinération à haute température se déroule à Bâle chez Valorec.

En ce qui concerne les bases, les filières sont similaires. Les bases de décapage provenant des industries horlogères (NOGA division C26) sont traitées selon un procédé physico-chimique. Lorsque ces déchets sont trop contaminés pour être récupérés, ils sont incinérés en cimenterie.

Les principaux potentiels en termes de symbioses industrielles identifiés concernent les acides phosphorique et sulfurique. Dans le premier cas, une entité économique du projet pilote de Genève issue du secteur de l'industrie pharmaceutique en rejette une quantité importante, concentrée à 80% et dont la teneur en carbone organique est inférieure à 5%. Jusqu'en 2006 environ, ce flux a été valorisé énergétiquement dans l'UIOM des Cheneviers. Le coût d'élimination était alors très élevé pour l'entité productrice, soit plus de 800 CHF par tonne. Depuis lors, une symbiose industrielle a été mise en place. Les pouvoirs publics ont accepté la requête officielle et autorisé sa mise en place. Celle-ci est décrite dans la Section 4.2.1.6. L'échange est rentable pour les deux partis et participe à la réduction des impacts environnementaux des deux secteurs concernés en réduisant la demande en matière première et en évitant l'incinération. Le même type d'échange a été mis en place pour de l'acide sulfurique, qui est amené de Suisse allemande pour être utilisé pour ses activités de traitement des eaux dans l'industrie chimique.

4.4.11.6 N° 16.6 – Echanges d'hydrure de polyméthylsiloxane

L'hydrure de polyméthylsiloxane, également appelé PMHS ou siliconate est un flux générique de l'industrie chimique (NOGA division C20). Sa formule est : $-(SiH(CH_3)-O)-_n$. Il s'agit d'un sous-produit issu de l'utilisation de Cetalox®, un hydrocarbure polycyclique connu pour ses propriétés odorantes. Le PMHS, très compliqué à éliminer, est incinéré par l'UIOM du canton de Genève. L'entité productrice a effectué il y a quelques années une étude dont les conclusions proposaient de valoriser le sous-produit dans le secteur de la production de produits minéraux (NOGA division C23), comme ignifugeant pour tuiles ou pour briques.

Techniquement, le taux d'impureté, très important, handicape la mise en place d'un échange. Cependant, au vu du coût de traitement élevé de ce déchet, l'entité productrice dispose d'une marge de manœuvre importante pour mettre en place un procédé intermédiaire de purification. Une seconde contrainte technique existe. En Suisse romande, les entités économiques du secteur des produits minéraux (NOGA division C23) qui ont été consultées refusent d'envisager cette valorisation car leurs procédés de production n'intègrent actuellement aucun additif. L'intégration du PMHS dans les produits minéraux représente une forme de sous-cyclage au sens de la Loi de protection de l'environnement (LPE 1983), ce que celle-ci interdit. De plus, la pureté des matériaux de construction doit être maintenue pour faciliter leur réutilisation dans les prochaines décennies (voir chapitre 4.4.7). Ainsi, aucune alternative rentable et économiquement pertinente n'est envisageable en l'état de la technique actuelle pour le PMHS.

4.4.11.7 *Synthèse et conclusion*

Dans les cantons de Genève et Vaud, plusieurs opportunités de symbioses industrielles existent pour les produits chimiques. Des acteurs économiques du secteur de la chimie l'ont bien compris puisqu'ils ont recours à cette pratique depuis plusieurs années. Il convient maintenant de répliquer ces opportunités.

La première option consiste en la création d'une mutualisation de régénération de solvants (n°16.1) en Suisse romande. Cette opportunité est fortement handicapée par une contrainte technique, l'adéquation quantitative, et par la difficulté de rendre cette installation rentable sur un territoire aussi restreint. Lorsque le bilan environnemental de la valorisation des solvants usagés encourage la distillation, une solution pourrait être trouvée avec Tredi-Séché situé à Saint-Vulbas, dans la Plaine de l'Ain. Cette entreprise collecte des solvants usagés pour les régénérer. Sa situation, proche de la frontière Suisse, en fait une solution intéressante pour limiter les transports de flux. Néanmoins, pour favoriser l'utilisation de son installation de régénération, des autorisations seront nécessaires afin de justifier l'exportation d'un déchet qui peut être valorisé à l'intérieur des frontières nationales.

Pour résumer les opportunités de symbioses industrielles, la réutilisation du méthanol usagé pour le traitement des eaux (n°16.2) est faisable. Cette solution existe déjà en Suisse et dans d'autres parties du monde. La synergie n°16.3 concernant le toluène est prometteuse mais sa faisabilité est liée à la difficulté technique de la réutilisation pour la production d'encre recyclée. La réutilisation de l'éthylène glycol (n°16.4) se heurte également à des contraintes techniques fortes. Finalement, les réutilisations des acides phosphorique et sulfurique pour les traitements des effluents industriels constituent des symbioses industrielles pré-existantes ayant fait leurs preuves. La synergie n°16.5 devrait donc être dupliquée en Suisse romande. Finalement, la réutilisation du PMHS (n°16.6) dans le domaine de la fabrication de produits minéraux représente un risque élevé de diffusion de substances dans l'environnement. Les contraintes légales et techniques sont ici considérées comme des contraintes éliminatoires.

En conclusion, certains acides (phosphorique, sulfurique) et solvants (méthanol) peuvent être réutilisés pour des activités de traitement des eaux en substitution de produits neufs. Plusieurs expériences intercantionales impliquant des entreprises genevoises existent déjà mais sans lien avec les STEP du canton. Leur présence à plusieurs endroits du territoire, couplée à leur potentiel comme repreneurs de produits chimiques, mérite une attention particulière.

4.4.12 Famille n°18 : Les vecteurs énergétiques et mécaniques

Cette dernière famille de flux traite de la production, de la transformation et de l'approvisionnement en énergie des activités économiques d'un territoire. Elle englobe les ressources non renouvelables utilisées en Suisse comme les combustibles fossiles liquides, le gaz naturel et l'énergie nucléaire, ainsi que les ressources renouvelables comme l'énergie hydraulique, la biomasse, l'éolien, la géothermie, l'hydrothermie et le solaire. Certaines ressources ont néanmoins déjà été discutées dans des sections précédentes. C'est le cas des huiles végétales et minérales qui sont des combustibles liquides (Section 4.4.6) et de la biomasse (Section 4.4.8). Après conversion de l'énergie primaire en vecteurs utilisables par les activités économiques, celle-ci se trouve soit sous forme d'électricité, soit sous forme de chaleur, transportée par air ou par fluides caloporteurs, comme l'eau. Celle-ci peut se trouver dans deux états, liquide (eau chaude) ou gazeuse (vapeur). L'énergie primaire ou l'électricité peuvent également être converties directement en un vecteur mécanique, l'air comprimé.

Réduire la consommation d'énergie et utiliser les sources disponibles de manière efficace relèvent aujourd'hui d'une préoccupation majeure pour les pouvoirs publics et des acteurs économiques. Le coût élevé de l'approvisionnement, la pénurie annoncée des combustibles fossiles et les nombreuses taxes destinées à lutter contre le changement climatique incitent les entités économiques à rationaliser leur consommation et à investir dans des systèmes de production et de transformation plus performants.

Le choix des ressources utilisées est primordial. Le recours aux énergies renouvelables en substitution des ressources fossiles est un objectif majeur de l'écologie industrielle. Cependant, l'efficacité de la conversion de la ressource primaire en un flux correspondant au besoin de l'activité considérée est également un élément central. La chaleur utilisée dans l'habitat, l'industrie et les transports est souvent produite avec une efficacité exergétique⁵⁵ inférieure à 10% (Marechal, Favrat et al. 2005).

La Confédération Suisse s'est engagée dans la voie de la Société à 2000 watts⁵⁶. Ce concept, créé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zürich en 1998, propose de réduire la consommation annuelle moyenne par habitant à 2'700 litres de pétrole à l'horizon 2050, ce qui équivaut à 2000 watts. La consommation actuelle en Suisse est environ trois fois supérieure.

La politique énergétique Suisse repose sur plusieurs textes de loi. Première base légale, la Loi sur l'énergie de 1998 vise à contribuer à un approvisionnement énergétique suffisant, diversifié, sûr, économique et compatible avec les impératifs de la protection de l'environnement. Ses autres objectifs sont de promouvoir une utilisation économe et rationnelle de l'énergie et d'encourager le recours aux

⁵⁵ L'exergie mesure la valeur thermodynamique de l'énergie. Elle définit le travail maximum qui peut être obtenu par unité d'énergie. La mesure de l'exergie est utilisée pour représenter de manière cohérente la quantité et la qualité des différentes formes d'énergie considérées. Il s'agit d'une mesure de l'efficacité de l'exploitation d'une ressource énergétique.

⁵⁶ <http://www.societe2000watts.com>

énergies indigènes et renouvelables (LEne 1998). Deuxièmement, l'Ordonnance sur l'énergie définit les types de production d'énergie ainsi que leurs attributions. Une différence est faite entre les entreprises chargées de l'approvisionnement de la collectivité, qui opèrent avec mandat, et les producteurs indépendants. Ces derniers transforment de l'énergie pour leurs propres besoins ou dans le but de l'injecter dans le réseau de distribution, mais sans mandat public. Le texte de loi fixe également les conditions et les prix d'achat pour le raccordement d'une installation de production indépendante d'énergie renouvelable au réseau public (OEne 1998).

Depuis la fin des années 1990, la Confédération a mis en place en série de mesures incitatives pour favoriser un usage rationnel de l'énergie. La plus importante est la Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO₂ (LCO2 1999), accompagnée en 2007 par l'Ordonnance sur la taxe sur le CO₂ (OCO2 2007). La taxe sur le CO₂, entrée en vigueur le premier janvier 2008, consiste à taxer la consommation des combustibles. Elle ne s'applique pas aux carburants. Les agents énergétiques fossiles concernés par la loi sont ceux utilisés pour produire de la chaleur, de l'électricité ou pour faire fonctionner une installation de couplage chaleur force. L'objectif de la loi est de diminuer leur consommation par une mesure dissuasive d'ordre financière. Le montant de la taxe s'élève, depuis le 1 janvier 2009, à 24 CHF par tonne de CO₂ émise en 2007 qui dépasse, selon les statistiques de l'OFEV, 90% du niveau de 1990 (OCO2 2007). Les recettes prélevées sont redistribuées à la population, par l'intermédiaire des assurances maladie, et aux entreprises, en proportion de leur masse salariale soumise à l'AVS. Autre mesure incitative, les entreprises qui s'engagent formellement à limiter leurs émissions de gaz à effet de serre sont exemptées de la taxe. Dans certains cas, les entités économiques participant à une symbiose industrielle peuvent être exemptées de la taxe et recevoir des subventions dont le montant est proportionnel au nombre de tonnes non émises dans l'atmosphère. La possibilité d'être exempté de la taxe est un incitatif majeur de la politique climatique et énergétique de la Suisse. Elle est très fréquemment citée par les entités économiques dans le cadre des études de cas de Genève et Lausanne Région.

Favoriser l'efficacité énergétique n'est pas du seul ressort de la Confédération. L'article 89 de la Constitution fédérale qui définit la politique énergétique, stipule que les cantons doivent reprendre les objectifs de la loi sur l'énergie et aider à leur mise en application (CFCS 1999). Comme nous le verrons par la suite, de nombreuses mesures incitatives et opportunités d'action existent à l'échelle cantonale.

Entre 2006 et 2008, nous nous sommes attelés à détecter des puits et des sources de rejets thermiques pouvant faire l'objet d'une récupération par d'autres acteurs du territoire. Les rejets considérés revêtaient deux formes : gazeuse (vapeur, air chaud ou froid) ou liquide (fluides caloporteurs chauds ou froids). Techniquement, l'écologie industrielle et les symbioses industrielles offrent de nombreuses solutions pour atteindre les objectifs fédéraux et cantonaux en matière d'efficacité énergétique. Elles ont d'ailleurs fait l'objet d'une littérature abondante, la composante énergétique étant souvent à la base de réseaux de symbioses industrielles (Ehrenfeld et Gertler 1997; Chertow 2000; Korhonen 2001; Korhonen 2002; Chertow et Lombardi 2005; van Beers, Corder et al. 2007). La plupart des projets en cours au niveau

international s'articulent autour de la production d'énergie à partir de déchets ou de biomasse (Mirata 2004; van Berkel, Fujita et al. 2009) ou d'une entité économique disposant d'un surplus de vapeur important (Ehrenfeld et Gertler 1997; Chertow et Lombardi 2005; Park, Rene et al. 2008). La première opportunité consiste à mutualiser l'approvisionnement en partageant des infrastructures de production et de distribution de vecteurs énergétiques ou mécaniques à partir d'énergie renouvelable. Cette solution favorise l'efficacité énergétique en centralisant sur des petites parcelles de territoire la production des vecteurs. Elle permet également de répondre de manière plus adaptée aux besoins des entités économiques en termes de quantité et de qualité. La deuxième opportunité concerne la création de réseaux d'échanges de chaleur résiduelle (vapeur et eau chaude). Elle permet de transférer un flux dont la qualité ne convient plus aux procédés d'une entité vers une autre qui pourra en faire usage, soit en l'état, soit après transformation par une pompe à chaleur (Tableau 31). Ces solutions sont discutées dans les sections suivantes. Une bonne adéquation qualitative, quantitative et temporelle est primordiale pour assurer un rendement énergétique suffisant et permettre d'atteindre le seuil de rentabilité économique. Ces deux types d'ouvrage sont envisageables dans les zones industrielles de Suisse mais elles impliquent une infrastructure coûteuse. Leur mise en œuvre est un travail de longue haleine. Ce type d'installation devrait être intégré de plus en plus fréquemment dans la planification des zones industrielles. Néanmoins, ces deux solutions ne sont pas suffisantes. La société à 2000 watts prône un recours massif aux énergies renouvelables endogènes lors de la création de ces infrastructures partagées. En Suisse, la biomasse recèle un potentiel de diversification considérable : elle pourrait fournir le tiers de la demande d'énergie primaire prévue par la société 2000 watts (Marechal, Favrat et al. 2005). Il est également primordial de la coupler à une amélioration de l'efficacité énergétique à l'intérieur des limites de l'entreprise. Les principaux outils sont issus de la production plus propre, définie dans le Chapitre 1. Il s'agit de substituer les procédés de production actuels par de nouvelles technologies consommant moins d'énergie. Dans ce domaine, les bioprocédés, opérant à faible température, représentent un fort potentiel. Il est également nécessaire d'optimiser l'intégration des procédés entre eux, afin de créer des synergies à l'intérieur des limites de l'entreprise (Marechal et Kalitventzeff 1998; Marechal, Favrat et al. 2005). Il apparaît d'ailleurs de plus en plus nécessaire de recourir à l'analyse de cycle de vie pour comparer les différentes solutions.

Tableau 31 : Symbioses industrielles potentielles détectées pour les études de cas de Genève et Lausanne Région pour la famille de flux 18 : vecteurs énergétiques et mécaniques. Source : auteur.

N°	Flux	Type	Secteur producteur		Secteur utilisateur		Type de symbiose industrielle	Hiérarchie des déchets en cas de symbiose industrielle	Filière de valorisation actuelle	Secteur de valorisation		Hiérarchie des déchets (actuelle)
			Secteur	Division	Secteur	Division				Secteur	Division	
18.1	Production de chaleur / vapeur	-	-	-	-	-	Mutualisation de production / partage d'infrastructure	-	Petites entités dispersées	-	-	-
18.2	Vapeur et eau chaude résiduelles	co-produit	-	-	-	-	Echange	Réutilisation	Emission à l'atmosphère	-	-	-

4.4.12.1 La politique énergétique du canton de Genève

Depuis plusieurs années, la politique énergétique du canton de Genève s'appuie sur la vision du Conseil Fédéral d'une société à 2000 watts. Genève a ajouté la particularité d'y parvenir sans recours à l'énergie nucléaire. Ce modèle fait l'objet d'un large consensus politique à Genève. Le Grand Conseil l'a voté à l'unanimité dans le but d'anticiper la raréfaction des combustibles fossiles.

Du point de vue de la législation, la Loi sur l'énergie de 1986 reprend les objectifs de la loi fédérale en favorisant un approvisionnement énergétique suffisant, sûr, économique, diversifié et respectueux de l'environnement (LEnGE 1986). Le Règlement d'application de la loi sur l'énergie, quant à lui, définit les modalités de l'organisation et de la planification énergétique du canton (REnGE 1988).

Le ScanE, service en charge du dossier pour l'Etat de Genève, base ses actions sur deux documents : un document stratégique, la Conception générale de l'énergie (Stulz et Pandocchi 2006) et un document opérationnel, le Plan directeur cantonal de l'énergie (ScanE 2005). Les versions en vigueur de ces deux textes sont valables pour la période 2005-2009. Le Plan directeur cantonal 2005-2009 fixe les priorités suivantes : maîtriser et réduire les consommations pour tous les usages, mettre en œuvre des systèmes de transformation efficaces, favoriser un usage local des énergies renouvelables et des rejets thermiques et assurer un approvisionnement en énergies certifiées de bonne qualité. La politique énergétique actuelle repose sur trois piliers : la maîtrise de la demande, l'utilisation rationnelle de l'énergie et le développement des énergies renouvelables endogènes. Le premier enjeu consiste à rendre les énergies renouvelables largement prioritaires. Or, elles sont disponibles en abondance à Genève. Plusieurs études ont permis ces dernières années d'évaluer et de localiser avec précision les potentiels géothermique, hydrothermique, solaire et de valorisation de la biomasse.

Les principes de l'écologie industrielle sont donc déjà largement pris en compte dans la politique énergétique du canton.

4.4.12.2 N° 18.1 – Mutualisation de la production de chaleur / vapeur

La chaleur et la vapeur nécessaires aux activités économiques sont produites à partir de combustibles fossiles comme le gaz naturel ou le mazout. Ceux-ci sont brûlés dans une multitude de chaudières installées au sein de chaque entreprise et de chaque bâtiment d'habitation. Ces petites installations permettent de répondre facilement aux besoins de l'entité à laquelle elles appartiennent mais leur efficacité exergétique très faible. Le principal problème provient du procédé de combustion. Les combustibles fossiles liquides ou le gaz naturel sont brûlés à une température de plusieurs centaines de degrés pour répondre aux besoins de chauffage de bâtiments de production ou administratifs, soit entre 50 et 60 °C ou pour produire de la vapeur sous pression.

Il est aujourd'hui possible de dimensionner des installations permettant de produire toutes les qualités de flux énergétique : production de vapeur à haute température et pression, production de chaleur pour les besoins de chauffage, production de froid pour la climatisation, production d'eau chaude pour les procédés ou l'usage sanitaire. Une solution consiste en la décentralisation de la production et de la cogénération (électricité, chaleur) ou de la trigénération (électricité, chaleur et froid) souvent combinée à la possibilité de modifier la température d'un flux grâce à la technologie des pompes à chaleur. L'intégration de la cogénération et des pompes à chaleur dans des réseaux à petite échelle recèle un fort potentiel de gain d'efficacité en améliorant l'efficacité exergétique et en réduisant les pertes liées au transport (électricité) sur de longues distances grâce à un rapprochement du producteur et de l'utilisateur (Marechal, Favrat et al. 2005). La construction d'installations mutualisées permet également de répondre de manière individuelle et efficace aux besoins de confort de chaque industriel. Une symbiose industrielle pré-existante existe d'ailleurs à Genève, il s'agit du projet Genève-Lac-Nation détaillé dans la Section 4.2.1.7. D'autres projets similaires sont en cours d'étude ou de mise en œuvre.

La mise en place d'une planification des zones industrielles et de leur environnement direct intégrant des infrastructures partagées de production et de distribution d'énergie fait partie des solutions proposées par des chercheurs en écologie industrielle (Korhonen 2001; Korhonen 2002). A Genève, pour mettre les énergies renouvelables au centre de la problématique énergétique, un nouveau type de planification a été créé. Il inverse la tendance générale, qui veut que l'on cherche la manière de répondre le mieux aux besoins, en évaluant d'abord les ressources disponibles sur une portion du territoire. Les besoins sont ensuite évalués afin d'établir un lien entre l'offre et la demande (Girardin, Marechal et al. 2010). Les besoins sont finalement adaptés en fonction de la ressource renouvelable disponible. Le Plan Directeur 2030 introduit l'énergie comme un nouveau critère de décision pour l'aménagement du territoire. L'objectif est que celui-ci soit mieux organisé en fonction des ressources renouvelables en définissant des zones correspondant à des besoins énergétiques.

L'objectif est de créer des quartiers qui produisent plus d'énergie qu'ils n'en consomment, tout en répondant à tous les types de besoins des ménages et des entreprises. Ils sont appelés quartiers à énergie positive. L'exemple du quartier Praille – Acacias – Vernets est très représentatif : les études des

potentiels hydrothermiques (Arve), géothermiques et solaire ont montré que le quartier pouvait produire davantage que les besoins prévus.

Les paramètres à prendre compte pour le dimensionnement d'installations mutualisées sont nombreux : choix des ressources énergétiques, choix des vecteurs produits ainsi que de leur qualité et quantité pour répondre aux besoins de confort, potentiels d'utilisation en cascade. Mais outre la dimension technique, le changement organisationnel est important pour les entreprises concernées. L'entité économique devient acheteuse d'un flux produit par une entité extérieure, mais dont elle fait partie, ou par un producteur indépendant, qui devient alors un tiers opérateur. Il y a donc suppression d'un processus de production et l'entreprise perd partiellement le contrôle d'un procédé. Si les bénéfices économiques et environnementaux peuvent être importants, l'investissement et la planification d'un projet de ce type sont des tâches de longue haleine, ce qui les rend sensibles aux changements de stratégie fréquents des industriels.

La société 2000 watts correspond à une vision à long terme. De nombreux acteurs économiques du secteur secondaire posséderont encore longtemps des installations de grandes tailles destinées soit à produire de la vapeur, soit à cuire leurs produits. Il est nécessaire d'optimiser ces procédés et ces infrastructures afin d'améliorer leur efficacité. Le programme Eco21, à Genève, propose aux entreprises des services et des financements allant dans ce sens.

La mise en œuvre des installations décrites dans cette section est un processus s'étalant sur plusieurs décennies. Nous sommes donc à l'orée d'une période de mutation. Les activités économiques auront encore recours aux combustibles fossiles liquides et gazeux pendant de nombreuses années. Il est cependant possible de les utiliser de manière beaucoup plus efficace en recourant à la cogénération et à la mutualisation. A titre d'exemple, un projet de centrale à gaz au Lignon est à l'étude à Genève. La chaleur produite permettra d'alimenter le réseau de chauffage à distance Cadiom situé sur la rive gauche.

4.4.12.3 N° 18.2 – Echanges de vapeur et d'eau chaude résiduels

Si la production centralisée des vecteurs énergétiques au sein d'une ZI permet un usage plus efficace de l'énergie, il est souvent intéressant de valoriser en parallèle la chaleur résiduelle co-produite par les activités économiques d'une ZI. Comme énoncé précédemment, cette solution est pertinente dans la phase de transition vers des systèmes de production répondant aux besoins de confort, sans surplus. Actuellement et pour quelques décennies encore, de nombreuses activités évacuent la chaleur et/ou le froid dont elles n'ont plus l'utilité au sein de leur chaîne de production : air chaud issu de fours, vapeur d'eau de moindre qualité, air chaud ou eau chaude issus de procédés de refroidissement. L'eau étant souvent le fluide caloporteur des rejets de chaleur, cette synergie doit être considérée en lien avec les propositions faites pour la synergie n° 4.1 concernant la valorisation de l'eau matière contenue dans l'eau de refroidissement (Section 4.4.4.1).

Les rejets de chaleur peuvent être séparés en deux catégories : ceux dont la qualité est suffisante pour pouvoir être réutilisés directement par une autre entité économique et ceux dont la qualité est trop faible, nécessitant l'utilisation de pompes à chaleur. Cette technologie permet de transférer de la chaleur résiduelle d'un flux froid vers un flux chaud de qualité suffisante pour être utilisé pour des activités industrielles ou sanitaires, le plus souvent pour les besoins de chauffage, soit entre 50 et 60 °C. La création de tels réseaux nécessite souvent plusieurs sources, ainsi qu'une demande bien identifiée. La rentabilité économique est en effet fonction de la quantité d'énergie pouvant être produite et de l'étendue du réseau à construire pour approvisionner les entités utilisatrices (Kim, Kim et al. 2009). L'adéquation géographique est un élément très important pour la mise en œuvre de projets de ce type. Une distance à parcourir de plusieurs kilomètres devient éliminatoire pour des raisons qualitatives et économiques. Ce type de projet est long et coûteux à mettre en œuvre. Cependant, le gain environnemental généré en tonnes de CO₂ économisée peut être important.

Plusieurs sources d'air chaud et de vapeur de bonne qualité ont été identifiées dans les études de cas de Genève et de Lausanne Région. Il s'agit pour certains de rejets d'air chaud ou de vapeur à plus de 200°C. Les principales sources sont l'industrie alimentaire (NOGA division C10) et ses fours de cuisson, le secteur de l'impression (NOGA division C18) et l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21). Ces rejets sont très souvent disséminés sur le territoire et leur regroupement n'est pas envisageable. Au cours des audits, des potentiels d'optimisation interne ont très souvent été détectés, par exemple en optimisant l'intégration énergétique des procédés. Dans les cas où l'énergie ne peut pas être utilisée par les procédés de l'entité productrice, une solution externe peut être envisagée.

Certains flux de qualité moindre peuvent également être valorisés de manière isolée, pour autant que les quantités soient suffisantes. Le cas d'une entité du secteur de l'industrie pharmaceutique (NOGA division C21) de la région de Lausanne est intéressant. La chaîne de production rejette chaque année entre 50'000 et 80'000 m³ d'eau à une température de 70°C. Celle-ci ne peut pas être réutilisée à l'interne de l'entreprise, la demande pour un tel flux étant inexistante. Le flux, s'il n'est pas valorisé, doit être refroidi, ce qui coûtera de l'ordre de 600'000 CHF à l'installation et 40'000 CHF de frais de fonctionnement. Deux pistes de valorisation sont envisagées : l'utilisation de cette eau pour le chauffage de centres commerciaux voisins (NOGA division G47) ou la valorisation de la chaleur dans des cultures agricoles sous serres (NOGA division A1). Ces deux solutions sont techniquement réalisables, la qualité et la quantité à disposition étant suffisantes pour assurer la rentabilité économique d'une installation de transfert (pipeline). Dans les deux cas également l'échange permet l'économie de combustible et donc d'éviter des émissions de CO₂. Le cas de la valorisation dans une activité liée à l'agriculture présente le double avantage de permettre la valorisation de l'eau en tant que matière suite à l'utilisation de la chaleur qu'elle contient. Cette opportunité est à considérer en lien avec la synergie n° 4.1 (Section 4.4.4.1).

Finalement, certaines zones industrielles regroupent un grand nombre de rejets, mais dont la qualité est insuffisante pour faire l'objet d'une valorisation individuelle. Un projet de ce type s'est développé dans le projet pilote de Genève sous l'impulsion du Service cantonal de l'énergie (ScanE), en collaboration avec

le groupe de travail Ecosite. La zone industrielle de Plan-les-Ouates (ZIPLO) regroupe plusieurs entités économiques fortement consommatrices ou productrices de chaleur ou de froid. Les secteurs de la fabrication de produits informatiques, électroniques et optiques (NOGA division C26), de l'industrie alimentaire (NOGA division C10), de la fabrication d'équipements électriques (NOGA division C27), de produits métalliques (NOGA division C25), ainsi que de soutien aux entreprises (NOGA division N82) sont les plus représentés. L'opportunité consiste à regrouper les flux et, grâce à des pompes à chaleur, à créer un flux de qualité suffisante pour être utilisé pour le chauffage de bâtiment. La différence avec la synergie n° 16.1 réside dans la contrainte technique. L'installation de pompes à chaleur implique la création de deux réseaux, un pour la collecte et un pour la distribution, ce qui complique sa mise en œuvre et renchérit sa réalisation. En 2007, le groupe de travail Ecosite, en collaboration avec le ScanE et le bureau de conseil Enercore, a étudié la possibilité de créer un réseau d'échange de chaleur dans la zone industrielle de Plan-les-Ouates. Ce réseau doit relier les activités industrielles de la ZI aux activités de maraîchage voisines de la Plaine de l'Aire. La collecte mutualisée des rejets en vue de leur réutilisation, mais également des efforts et des moyens financiers, aurait abouti à augmenter l'efficacité énergétique de l'ensemble des activités de la ZI. Le projet, sous sa forme de 2007, devait permettre une économie annuelle d'énergie fossile de l'ordre de 24 GWh et une réduction des émissions annuelles de CO₂ de 6'000 tonnes. A ce bilan environnemental positif s'opposaient néanmoins des distances trop importantes entre les acteurs concernés et de nombreuses incertitudes économiques. Le temps de retour sur investissement (environ 30 ans), calculé sur la base des prix actuels de l'énergie, ne permettait pas d'atteindre un seuil de rentabilité suffisant. L'augmentation prévisible des prix de l'énergie pourrait changer la donne rapidement.

Ce projet pilote a permis d'une part de mettre en évidence la faisabilité technique d'un tel projet et d'autre part d'évaluer les distances maximales pouvant être parcourues en fonction de la quantité de chaleur résiduelle à disposition. Les études actuelles étudient la faisabilité d'un stockage saisonnier (été) de la chaleur en vue de sa réutilisation lorsque les besoins de chauffage sont importants (hiver). Un autre projet est en cours d'étude dans la même zone pour alimenter le futur quartier des Cherpines à partir des rejets thermique de l'entreprise Rolex.

Les serres agricoles sont d'importants consommateurs d'énergie. Elles sont des partenaires idéaux pour valoriser des rejets de chaleur d'activités économiques voisines. Un projet va être prochainement déposé à l'office fédéral de l'agriculture pour inciter à une meilleure planification de leur localisation en fonction des ressources renouvelables endogènes.

4.4.12.4 Synthèse et conclusion

La famille des vecteurs énergétiques et mécaniques est un maillon central des réseaux de symbioses industrielles. Au niveau international, de nombreux projets se sont construits autour d'une source de chaleur ou de vapeur résiduelle. Ces réseaux sont cependant basés soit sur une activité économique de

production d'électricité à partir de combustibles fossiles non renouvelables (Ehrenfeld et Gertler 1997; Chertow et Lombardi 2005), soit sur des installations d'incinération des ordures ménagères (Mirata et Emtairah 2005) ou de la biomasse (Paquin et Howard-Grenville 2009). La première option ne peut représenter une solution d'avenir. Il n'est pas envisageable d'imaginer aujourd'hui des systèmes centralisés, même très efficaces, reposant sur des combustibles fossiles. La deuxième option est plus pertinente, même si les ordures ménagères mélangées devraient à terme disparaître. La problématique de la biomasse est plus complexe (Section 4.4.8).

Ainsi la mutualisation de production d'énergie sur des territoires de la taille d'un quartier ou d'une zone industrielle représente la solution de l'avenir, pour autant que les agents choisis soient renouvelables et les besoins de confort satisfaits (n°18.1). La synergie n° 18.2., qui consiste à valoriser les rejets de chaleur des entités économiques est également intéressante. Cependant, elle constituera dans certains cas une solution transitoire pendant l'émergence des nouveaux moyens de production et de distribution basés sur les énergies renouvelables.

4.4.13 Les mutualisations de collecte et d'approvisionnement

Cette section concerne un aspect particulier des symbioses industrielles : les mutualisations de collecte et d'approvisionnement. Plusieurs symbioses pré-existantes et potentielles de ce type ont été discutées dans ce chapitre.

La bourse alimentaire mise en place par l'association Partage à Genève est un excellent exemple de collecte sélective réalisée grâce à la mobilité douce (Section 4.2.1.4). Les flux récoltés sont ensuite redistribués pour l'alimentation humaine, donc réutilisés. La collecte et la réparation de palettes en bois par des recycleurs permettent également d'augmenter le nombre de réutilisations (Section 4.2.1.5). Il ne s'agit cependant pas de mutualisation à proprement parler puisque Partage et Swisspalettes sont des entités économiques à part entière. Le projet Genève-Lac-Nation est quant à lui un parfait exemple de mutualisation de production et d'approvisionnement : les entreprises d'une zone se sont unies pour mettre en place un approvisionnement conjoint et, en l'occurrence, renouvelable. L'Etat a servi de tiers investisseur pour le démarrage du projet (Section 4.2.1.7).

Plusieurs propositions pour créer de nouvelles collaborations de ce type ont été énoncées dans les sections précédentes⁵⁷ :

- La mutualisation de collecte et de traitement du bois souillé (Section 4.4.2.3) ;
- La mutualisation de collecte du carton afin de favoriser sa réutilisation, soit directement par les entreprises soit par l'intermédiaire d'un tiers opérateur (Section 4.4.3.2) ;
- La substitution et la mutualisation de l'approvisionnement en eaux souterraines et de surfaces non potables (Section 4.4.4.2) ;
- La mutualisation de collecte et de traitement des encres et pigments usagés (Section 4.4.5.2) ainsi que du toluène (Section 4.4.11.3) afin de produire des encres recyclées ;
- La mutualisation et le traitement des huiles de coupe, soit directement par les entreprises soit par l'intermédiaire d'un tiers opérateur (Section 4.4.6.2) ;
- La proposition de mutualisation de la régénération de certains solvants, soit directement par les entreprises soit par l'intermédiaire d'un tiers opérateur (Section 4.4.11.1).

Un des potentiels de mutualisation de collecte n'a cependant pas été traité car il concerne plusieurs familles de flux. Il s'agit de la mutualisation de collecte des déchets au sein des zones industrielles. La

⁵⁷ Certaines des solutions impliquent la création de nouvelles activités. Cette solution entre dans le concept strict des symbioses industrielles uniquement lorsque l'activité est mise en œuvre directement par les activités économiques concernées. L'entreprise créée peut néanmoins appartenir au secteur de la collecte, du tri et du recyclage des déchets (NOGA division E38).

situation décrite dans la section suivante concerne les cas dans lesquels des prestataires de services collectent plusieurs déchets de manière séparée ou conjointe. Il est alors possible de mutualiser cette activité.

4.4.13.1 *Mutualisation de la collecte des déchets dans les zones industrielles*

Pour introduire cette thématique, il est intéressant de détailler le cas du canton de Genève. L'optimisation de la collecte des déchets et leur transformation en matières premières secondaires pour les activités économiques de Genève sont des enjeux de taille dans une agglomération aux voies de communication fortement sollicitées. Réduire le nombre de mouvements de camions en lien avec la collecte des déchets pourrait constituer une solution, parmi d'autres, pour améliorer le trafic dans les zones industrielles.

Le Plan de gestion des déchets 2009-2012 (GESDEC 2009) n'est actuellement pas contraignant pour les acteurs privés. Si ses objectifs ne sont pas atteints, il pourrait être nécessaire de modifier la base légale afin de renforcer la législation. En s'appuyant sur les données disponibles aux échelles cantonale et nationale, ainsi que sur des entretiens, l'analyse des filières de valorisation des déchets des entreprises, de leur collecte et de leur cheminement met en évidence les potentiels de relocalisation du traitement des déchets sur le territoire du canton et de mutualisation de collecte.

Premièrement, Genève dispose sur son territoire de plusieurs plateformes de réception des déchets capables d'identifier les fractions valorisables sur les marchés suisse et étranger. La qualité des déchets spéciaux devient problématique lorsqu'on les mélange. Plus le nombre de substances est important, plus ils sont difficiles à valoriser. En ce qui concerne les produits chimiques, il est nécessaire de séparer le plus possible la collecte et le stockage en fin de vie afin de faciliter la réutilisation ou le recyclage de ceux qui le permettent. Pour les déchets non spéciaux, le groupe de travail Ecosite a mis en évidence le rôle des recycleurs pour optimiser certaines filières comme le papier-carton, les plastiques (PS, PSE, PVC, ABS), la biomasse ou les pneus. Le défi actuel consiste à exploiter ces capacités pour favoriser la réutilisation dans les limites cantonales et à défaut dans les limites nationales. Les collecteurs et recycleurs genevois ont donc un rôle stratégique à jouer comme intermédiaires en faisant le lien entre entreprises pour les flux ne pouvant être directement valorisés par des symbioses industrielles.

Deuxièmement, un atelier d'écologie industrielle organisé dans la zone industrielle de Plan-les-Ouates en 2007 (Section 2.6.1) a mis en évidence le nombre important de prestataires de services actifs sur la zone et le manque de coordination entre eux. Les situations sont multiples :

1. Les grandes entreprises disposent en général d'une organisation interne indépendante. Les volumes étant importants, un tri et un conditionnement adéquats sont en général de mise aujourd'hui. Ces entreprises ont des contrats de prestation avec des partenaires attitrés. L'année de l'atelier, la motivation pour mutualiser leur collecte avec d'autres entreprises voisines était faible.

2. Les entreprises de taille moyenne pratiquent également le tri à l'interne. Dans certains cas, les activités de conditionnement et de collecte sont déjà mutualisées, par exemple avec d'autres entreprises présentes dans le même bâtiment grâce à une déchetterie commune. Par contre, les petits volumes de déchets spécifiques posent problème, ce qui aboutit parfois à une multiplication des prestataires externes, jusqu'à huit pour une seule entité.
3. Les petites entreprises ne pratiquent par contre pas systématiquement un tri à l'interne car elles ne disposent pas de l'espace ni des infrastructures nécessaires. Dans certains cas, il existe un prestataire attiré par bâtiment. Ces entreprises ont recours aux centres de collecte communaux lorsqu'un tri existe ou elles envoient simplement leurs déchets mélangés à l'incinération.

Cette situation pose deux problèmes. Premièrement, le taux de 70% de recyclage des déchets d'entreprises souhaité par le Plan de Gestion des Déchets est rarement atteint (GESDEC 2009). Deuxièmement, étant donné qu'il existe autant de situations que d'entreprises, il en résulte un nombre important de transports.

Les possibilités de mutualisation sont donc multiples. Les solutions suivantes sont envisageables :

- Créer des espaces de récupération communs, sur le modèle des ESREC déjà existants à Genève. Dans ce cas, l'Etat joue le rôle de collecteur ;
- Mettre en œuvre des mesures pour inciter les prestataires de services à mettre en place des plannings de levée optimisés, afin de réduire les tonnes-kilomètres parcourues ;
- Inciter les entreprises à collaborer afin de négocier des prestations de collecte mutualisées auprès des collecteurs et ainsi réaliser des économies d'échelle. Plusieurs entreprises proches géographiquement ou possédant les mêmes types de déchets peuvent développer des appels d'offre conjoints.

Les trois actions précédentes constituent un ensemble destiné à accroître le dialogue entre les entreprises, les repreneurs et l'administration publique afin d'aboutir à la mise en œuvre de nouvelles filières de valorisation plus efficaces. L'expérience acquise lors de la réalisation des dernières études pour le groupe de travail Ecosite montre que les recycleurs sont intéressés par de nouvelles solutions. Ils sont cependant méfiants envers l'Etat, perçu le plus souvent uniquement comme un organe de contrôle. Dans un marché libre, la troisième solution semble la plus prometteuse. Elle demande cependant une réflexion commune entre les acteurs. Le coordinateur d'un projet de symbioses industrielles peut servir d'élément déclencheur.

Toutes les entreprises ne seront pas intéressées. Les grandes entreprises devraient être les plus difficiles à convaincre : leur autonomie et leur bonne connaissance de leurs flux de matière les incitent à fonctionner de manière autonome. Cependant, la participation à un projet de mutualisation pourrait leur

permettre d'optimiser leur logistique, de gagner de la place et de réaliser des économies d'échelle. Les petites et moyennes entreprises devraient normalement être plus ouvertes. Comme elles ont peu de ressources humaines à consacrer à cette thématique, la mutualisation constitue une manière peu coûteuse d'améliorer ou simplement d'externaliser leur gestion. Le manque de ressources humaines et financières constitue aujourd'hui le principal handicap à la mise en place de ces solutions.

Pour sensibiliser les acteurs économiques, le coordinateur peut proposer des actions d'information, un accompagnement technique pour identifier les flux de matière dont la collecte peut être mutualisée et la mise en œuvre des solutions par les recycleurs et les entreprises intéressées.

4.5 DISCUSSION

Nous avons cité Pierre Desrochers dans le Chapitre 1 pour affirmer qu'il existe très souvent des symbioses industrielles pré-existantes sur un territoire. Si le constat est juste, les raisons étaient alors très différentes de celles qui nous occupent aujourd'hui. En particulier, elles n'étaient mises en œuvre dans le but spécifiquement d'améliorer la consommation de ressources et de diminuer les impacts des activités économiques sur l'environnement (voir définition des symbioses industrielles dans la Section 1.4.3). La Suisse n'échappe pas à ce constat. Au cours des dernières décennies, les pouvoirs publics ont obligé ou soutenu la mise en place de nombreuses filières de valorisation pour les déchets d'entreprises afin que ceux-ci n'aboutissent pas dans les décharges. Comme nous l'avons expliqué dans la Section 1.6.2, la Suisse a fait le choix de l'incinération des déchets urbains et de certains déchets spéciaux depuis plusieurs décennies. Le pays se trouve aujourd'hui dans une impasse technologique due à la technique de combustion utilisée (pour les UIOM) qui ne permet pas d'améliorer l'efficacité du processus de combustion (Spoerri, Lang et al. 2010). La surcapacité d'incinération, et le fait que la production d'énergie soit considérée comme renouvelable, ralentissent l'essor du recyclage et de la réutilisation de certains matériaux. L'incinération est ainsi également un frein à la mise en place de certaines symbioses industrielles.

L'analyse des filières de collecte, conditionnement et valorisation de certains flux détaillée dans ce chapitre met en évidence deux problématiques. Premièrement, le principe du pollueur-payeur a obligé les entreprises à assumer la responsabilité et les coûts de la prise en charge de leurs déchets. Il s'agit du pilier de la gestion des déchets d'entreprises et en particulier des déchets dangereux ou soumis à contrôle. Son impact sur la gestion des ressources est positif. Deuxièmement, le marché libre du recyclage, soumis au principe du pollueur-payeur, laisse aux collecteurs des déchets la liberté de décider de leur devenir. Cette situation conduite parfois à l'incinération ou à l'exportation de certains matériaux pouvant être recyclés et réutilisés ce qui fait perdre à l'économie suisse des matières premières secondaires dont l'impact environnemental est inférieur à celui des matières premières importées. Pour des raisons économiques, ces considérations sont encore peu prises en compte par les pouvoirs publics et les acteurs économiques. Dans certains cas, il pourrait même être préférable de stocker temporairement certains matériaux, dans des décharges spécialement prévues à cet effet, afin d'attendre que leur recyclage, leur sous-cyclage ou leur réutilisation soit rentable et que des infrastructures de transformation puissent être créées. C'est le cas par exemple des matériaux de délais ou de démolition. Le stockage des matériaux de déblai permet de les réutiliser rapidement et localement. Il en est de même pour les graves issues de la démolition. Il est aujourd'hui possible de le recycler à moindre coût (Section 4.4.7). Ainsi, l'impact environnemental d'un béton produit à base de grave recyclé est inférieur à celui d'un béton issu de grave fraîchement extraites. Cet exemple permet d'introduire la notion de « mine urbaine ».

La ville et ses activités économiques constituent aujourd'hui un stock important de ressources, à l'image des matériaux de démolition (dont la partie inerte a été traitée dans la Section 4.4.7). Ces ressources ou matières premières secondaires constituent autant de réserves disponibles sur place et elles devraient en priorité être valorisées sur le territoire considéré, par exemple grâce aux symbioses industrielles.

L'histoire et les habitudes culturelles et politiques du territoire ont une grande influence sur l'essor des symbioses industrielles. Comme cela a été discuté dans la Section 2.6.4, les mécanismes cognitifs et structurels de la Suisse sont favorables à l'essor d'un écosystème industriel mature. Les projets pilotes utilisés comme études de cas le prouvent, car de nombreuses symbioses industrielles pré-existantes ont été mises en évidence. Les exemples présentés dans ce chapitre ne sont pas exhaustifs. Il est évident qu'il existe de nombreuses autres collaborations sur les territoires considérés. Ces symbioses industrielles ont émergé sans la présence d'un coordinateur de terrain tel que nous l'avons décrit dans la Section 2.5. Cependant, plusieurs des échanges et des mutualisations pré-existantes décrites dans les Sections 4.2.1 et 4.3.1 ont été mis en œuvre grâce à l'initiative et au travail de coordination d'institutions académiques, de consultants ou de pouvoirs publics, à travers des politiques publiques et des initiatives aux échelles municipales ou cantonales.

En conclusion, il est possible de décrire le territoire suisse romand comme un écosystème industriel partiellement mature. Il est évident que l'économie ne fonctionne pas de manière totalement linéaire. La plupart des matériaux sont valorisés et recyclés, et ce depuis l'essor du système industriel moderne. Même si de nombreuses réutilisations existent déjà, la plupart des filières de valorisation ne tiennent pas compte de l'apport de l'écologie scientifique et des connaissances actuelles des limites de la planète.

La Figure 66 propose une modélisation de l'écosystème industriel existant dans la région de Genève et Vaud. Les éléments présentés ici ne constituent pas une modélisation exhaustive du cheminement des flux de matière et d'énergie sur le territoire, il s'agit des symbioses pré-existantes détectées au cours des projets pilotes et de l'étude de certaines filières de valorisation qui s'apparentent à des échanges malgré l'intervention d'un intermédiaire. Ce schéma est un élément de séduction important pour communiquer sur les symbioses industrielles et inciter les entreprises d'un projet pilote à le mettre en œuvre. Il s'agit d'une représentation visuelle et esthétique permettant aux acteurs économiques de prendre conscience de leur place dans ce système. Sa puissance culturelle et cognitive est importante, il peut servir de base pour discuter des mesures incitatives qui pourraient être mises en place pour reproduire certaines des solutions proposées.

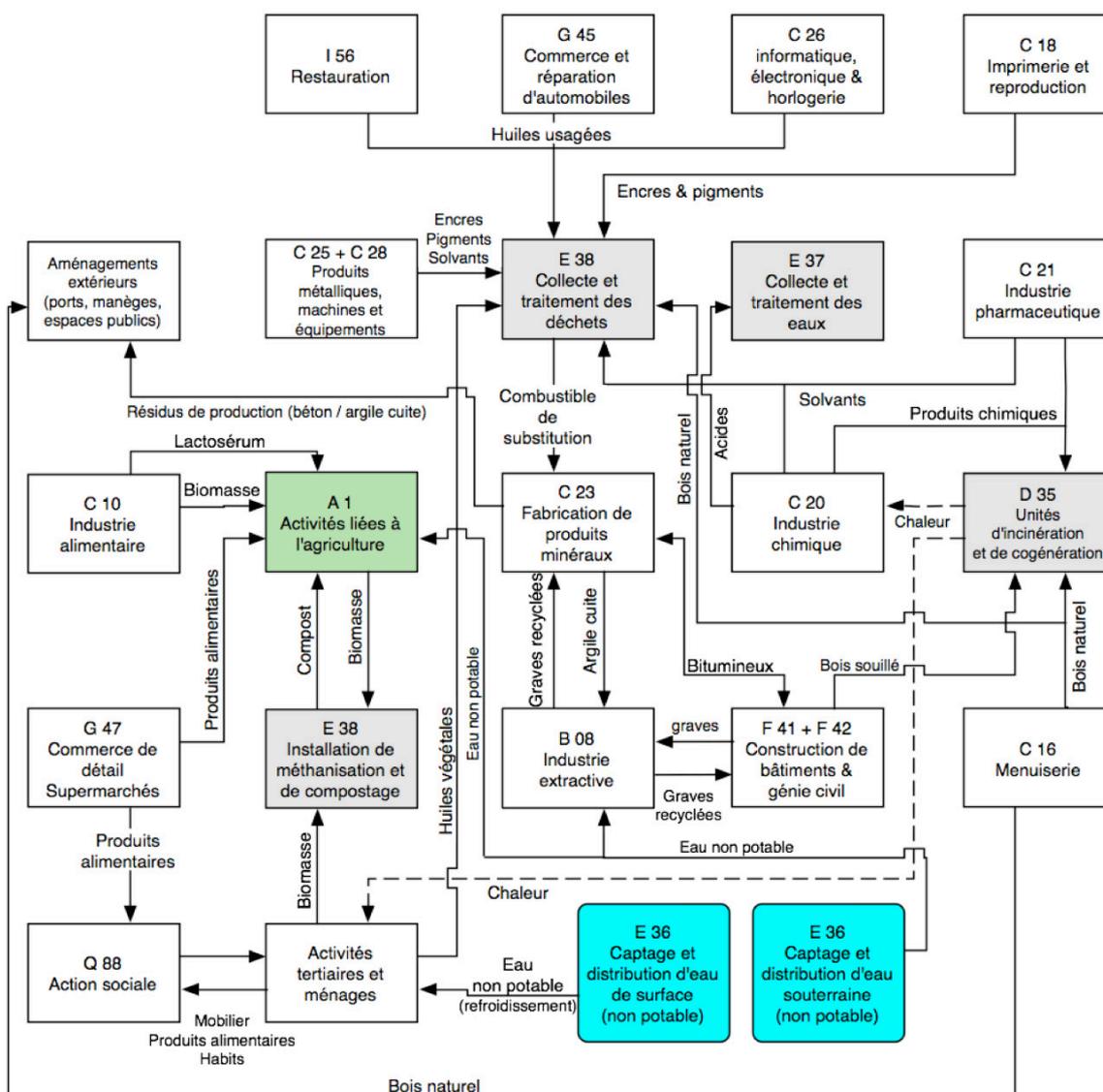


Figure 66 : Modélisation de l'écosystème industriel existant dans la région de Genève et Vaud pour les entités économiques ayant participé aux projets pilotes utilisés comme études de cas. Source : auteur.

L'objectif de ce travail est d'identifier des symbioses industrielles pertinentes dans le contexte Suisse et de proposer des procédures et des outils pour les analyser et faciliter leur mise en œuvre. Dans ce chapitre, de nouvelles opportunités ont été mises en évidence. La Figure 67 est une représentation schématique de l'écosystème industriel potentiellement réalisable sur les territoires du canton de Genève et de Lausanne Région. Ces symbioses industrielles potentielles, évaluées pour leur faisabilité technique, économique et légale ainsi que pour leur pertinence environnementale, sont reprises dans le Tableau 32. Il s'agit des opportunités réalisables sous conditions et de celles dont la réalisation a été fortement recommandée dans les sections précédentes. Certes, elles ne sont pas toutes facilement réalisables techniquement ni intéressantes économiquement pour les entreprises romandes à l'heure actuelle et les symbioses

industrielles potentielles décrites dans les sections précédentes ne représentent pas une liste exhaustive des opportunités, néanmoins, la Figure 67 permet d'énoncer un certain nombre de conclusions :

- 1. La dilution est interdite par la législation s'il y a un risque de diffusion de substances dangereuses dans l'environnement.** Il s'agit d'un handicap majeur pour la mise en œuvre de certaines symbioses industrielles. De nombreuses collaborations intersectorielles identifiées dans la littérature sont une forme de sous-cyclage et aboutissent à la dilution d'un flux, contenant parfois des substances polluantes, dans un autre. Dans les études de cas de Genève et de Lausanne Région, 9 des 27 pistes étudiées (33%) aboutiraient à la mise en place d'une filière de sous-cyclage qui en l'occurrence ne posent pas à priori de problèmes (Tableau 32).
- 2. Les contraintes liées aux adéquations quantitatives et géographiques réduisent parfois la faisabilité ou la pertinence d'une solution représentant pourtant en théorie une réduction des impacts environnementaux.** Le canton de Genève et Lausanne Région sont des territoires de petite taille fortement urbanisés. L'utilisation du sol y est très fragmentée et un grand nombre d'entités économiques de tous les secteurs d'activité, en particulier des petites et moyennes entreprises, y sont largement disséminées. L'industrie côtoie étroitement l'habitat et l'agriculture. Cette situation favorise la mise en place de certains types d'échanges de flux entre les différents secteurs des activités économiques traditionnellement séparés par les choix du zonage. C'est le cas en particulier des familles de flux énergie et eau. La réutilisation de ces flux doit être réalisée à une très petite échelle géographique pour être économiquement et techniquement rentable à cause des infrastructures de transport nécessaires.

Les études de cas ont mis en évidence que de nombreuses sources de chaleur résiduelle sont isolées par rapport aux autres entités économiques des projets pilotes. Cela ne signifie pas pour autant qu'il n'existe pas de possibilités de valorisation dans le voisinage immédiat. Seule une enquête de terrain locale peut révéler si une entité utilisatrice existe à une distance suffisamment faible pour permettre une valorisation efficace et pertinente (Section 2.4.1). La Figure 67 présente les opportunités de symbioses industrielles pertinentes en faisant abstraction de la composante géographique, afin de ne pas empêcher l'émergence d'une synergie impliquant d'autres entités que les 54 auditées dans les projets pilotes de Genève et de Lausanne Région.
- 3. La plus-value financière de la solution proposée par rapport à la filière de valorisation existante n'est pas toujours significative dans le contexte actuel.** L'analyse de faisabilité et de pertinence cherche à mettre en évidence cette valeur ajoutée en discutant la réduction des impacts environnementaux et les économies réalisables. Certaines opportunités discutées dans ce chapitre n'aboutiront vraisemblablement pas car la solution existante représente un optimum économique et environnemental dans le contexte politique et économique actuel, mais pas au sens de l'écologie scientifique. Dans ce cas, les acteurs économiques et les recycleurs ne voient pas l'intérêt de changer leurs habitudes. L'efficacité des filières actuelles de recyclage peut donc

être un handicap à la mise en place de symbioses industrielles. Pourtant, nous avons très souvent tendance à oublier que les activités de recyclage elles-mêmes génèrent des impacts sur l'environnement et sont parfois responsables de la diffusion de substances dans l'environnement. Dans ce cas, la réutilisation directe entre acteurs économiques peut permettre de les réduire en diminuant les processus de transformation et les transports. Dans le contexte actuel, les difficultés organisationnelles qu'impliquent la mise en œuvre de certaines symbioses incitent les acteurs économiques à rejeter la responsabilité sur les recycleurs qui jouent un rôle clé. En Suisse, il est très probable que les réutilisations de matières premières secondaires impliquant des intermédiaires, comme des collecteurs de déchets, vont se multiplier.

4. **Le rôle et la marge de manœuvre des pouvoirs publics et des coordinateurs de projet sur le terrain sont limités.** Imposer des changements d'habitudes, tenter de modifier des filières de valorisation pour aboutir à des symbioses industrielles, organiser la mutualisation de collecte des déchets ou réaliser une planification énergétique territoriale constituent des actions perçues comme interventionnistes dans un marché libre. Cependant, le contexte politique et cognitif en Suisse conditionne les acteurs économiques qui, du moment qu'ils se sentent accompagnés, semblent prêts au changement. Les travaux en cours dans le canton de Genève sur les graves recyclées (Section 4.4.7) et la planification énergétique territoriale (Section 4.4.12) montrent qu'il est possible d'influencer l'économie de manière constructive, en instaurant un contexte de collaboration et de confiance mutuelle.
5. **Les symbioses industrielles, nous l'avons dit à plusieurs reprises, ne constituent pas une fin en soi.** Elles ne représentent pas toujours un optimal environnemental, surtout dans certains cas de sous-cyclage, il existe naturellement d'autres solutions. Les initiatives visant à mettre en œuvre certaines des solutions proposées dans ce chapitre ne doivent pas oublier qu'il est primordial pour les entreprises de :
 - Travailler à la réduction des déchets à la source en intégrant les principes de l'éco-conception dans le design des produits et des procédés ;
 - Recourir aux technologies les plus efficaces pour les procédés de production et s'approvisionner en matières premières et en énergies renouvelables.

Ensuite seulement, il est recommandé d'adapter les procédés et installations afin de produire des matières premières secondaires utilisables par d'autres activités, lorsque la production d'un déchet ne peut pas être évitée. Les symbioses industrielles sont donc des filières de valorisation qui devront évoluer dans le temps afin de ne pas freiner l'installation de procédés plus efficaces et permettant d'économiser des ressources.

Les opportunités présentées dans la Figure 66 et la Figure 67 peuvent s'appliquer à l'ensemble du territoire suisse romand et même à l'ensemble du territoire national, en ce qui concerne l'analyse de la

législation. Dans ce cas, ces schémas devront alors être complétés en fonction des secteurs d'activité présents et des législations cantonales. Mais auparavant, pour relever les défis liés à l'essor des symbioses industrielles en Suisse, il est nécessaire de poursuivre des recherches selon plusieurs directions.

Premièrement, il est important d'affiner les connaissances techniques afin de s'assurer que les solutions proposées sont les plus efficaces techniquement et environnementalement. Pour cela, des collaborations avec des instituts de recherche en ingénierie et en science des procédés doivent être développées. Cette tâche doit être menée par des ingénieurs spécialisés dans les différentes familles de flux considérées, en recourant à l'analyse de cycle de vie pour comparer les scénarios de valorisation et les technologies utilisées.

Deuxièmement, il est primordial maîtriser au mieux les implications économiques et organisationnelles des symbioses industrielles. Les études de cas ont démontré que même lorsque la solution est pertinente, l'entreprise doit être accompagnée tout au long d'une procédure. Le modèle économique utilisé pour l'évaluation des symbioses (Section 2.4.3) doit être affiné et surtout, il doit être adapté à différents cas de figure et modes de fonctionnement de l'industrie afin de permettre la réalisation de plans de financement adéquats. Parallèlement à cela, la mise en œuvre des changements organisationnels prônés par une symbiose industrielle doit être accompagnée. Des recherches sur le management et la stratégie d'entreprise doivent être menées afin de faciliter l'engagement d'une entreprise dans un projet et la soutenir tout au long du processus de changement. Une approche des symbioses industrielles adaptée aux mécanismes cognitifs, culturels et structurels suisses par les méthodologies de la gestion de projet et de l'apprentissage organisationnel serait pertinente.

Troisièmement, il serait intéressant d'étudier plus précisément dans quels domaines les politiques publiques, déjà fortement structurantes, peuvent être renforcées sans porter atteinte à la liberté de commerce et au marché libre du recyclage des déchets d'entreprise. Il est également intéressant de discuter à quelle échelle institutionnelle des mesures incitatives peuvent être énoncées : les communes, les cantons ou la Confédération.

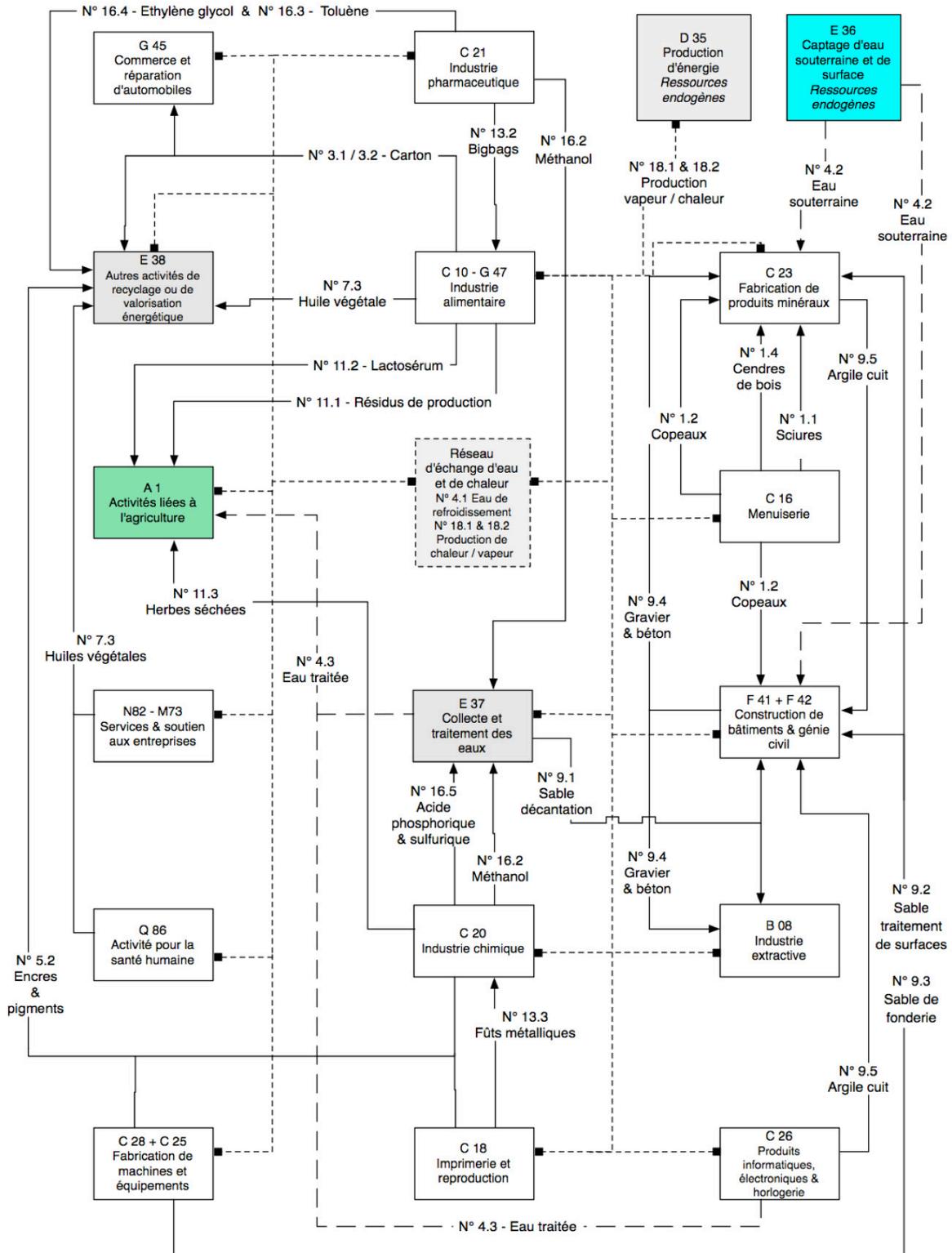


Figure 67 : Modèle d'écosystème industriel à Genève et en Suisse présentant les échanges de flux réalisables techniquement et légalement. Source : auteur.

Tableau 32 : Synthèse des symbioses industrielles pertinentes dans le contexte de la Suisse romande.

Source : auteur.

Famille	N°	Flux	Type de symbiose industrielle potentielle	Hierarchie des déchets en cas de symbiose industrielle
1	1.1	Sciures de bois naturel	Echange	Sous-cyclage
	1.2	Copeaux de bois naturel	Echange	Sous-cyclage
	1.4	Cendres de bois naturel	Echange	Sous-cyclage
3	3.1	Carton	Echange	Réutilisation avant valorisation
	3.2	Carton	Mutualisation de collecte et de traitement	Recyclage
4	4.1	Eau de refroidissement	Echange	Réutilisation
	4.2	Eau souterraine	Symbiose pré-existante / Substitution et mutualisation d'approvisionnement	Substitution de l'eau potable
	4.3	Eau traitée	Echange	Réutilisation
5	5.2	Pigments et peintures	Mutualisation de collecte et de traitement	Recyclage
7	7.3	Huile végétale	Symbiose pré-existante / Echange	Valorisation énergétique
9	9.1	Sable de décantation	Echange	Sous-cyclage
	9.2	Sable issu du traitement de surfaces	Symbiose pré-existante / Echange	Sous-cyclage
	9.3	Sable issu de fonderie	Echange	Sous-cyclage
	9.4	Gravier et béton	Echange / mutualisation de traitement	Recyclage
	9.5	Argile cuite	Echange	Sous-cyclage
11	11.1	Résidus de production	Symbiose pré-existante / Echange	Réutilisation
	11.2	Lactosérum (doux et acide)	Symbiose pré-existante / Echange	Réutilisation
	11.3	Herbes aromatiques séchées	Symbiose mise en place / Echange	Réutilisation
13	13.1	Palettes en bois	Symbiose pré-existante / Mutualisation de traitement	Réutilisation / création d'activité
	13.2	Bigbags (plastique)	Echange	Réutilisation
	13.3	Fûts	Echange	Réutilisation
16	16.2	Méthanol	Echange	Sous-cyclage
	16.3	Toluène	Mutualisation de collecte	Réutilisation ou recyclage
	16.4	Éthylène glycol	Echange	Réutilisation ou recyclage
	16.5	Acide phosphorique & sulfurique	Symbiose pré-existante / Echange	Sous-cyclage
18	18.1	Production de chaleur / vapeur	Mutualisation de production	-
	18.2	Vapeur et eau chaude résiduelles	Echange	Réutilisation

4.6 CONCLUSION

Ce chapitre propose une analyse du tissu économique existant en Suisse romande et en particulier dans le canton de Genève et le territoire de Lausanne Région. Il met en évidence des symbioses industrielles pré-existantes ainsi qu'un certain nombre de cas dans lesquels les symbioses industrielles constituent des solutions pertinentes. Vingt-sept flux de matière et d'énergie ont été discutés sous l'angle technique, légal, économique et environnemental. Ces solutions constituent, sous certaines conditions, une amélioration de l'efficacité de l'utilisation des ressources et des filières de valorisation. Elles sont décrites en fonction de la hiérarchie des déchets et de la réduction potentielle des impacts environnementaux. Néanmoins, les symbioses industrielles ne représentent pas toujours un optimum environnemental ou économique.

La plupart de ces opportunités peuvent être utilisées par un coordinateur de terrain qui souhaite identifier et mettre en œuvre des collaborations entre entreprises. Elles constituent une liste de potentiels pertinents qui permettent dans certains cas de ne pas réaliser d'audits complets des chaînes de production concernées. Pour appuyer encore la pertinence des solutions proposées et ainsi convaincre les entreprises de s'investir dans une symbiose, huit familles de flux de matière et d'énergie sont déjà partiellement organisées dans la réalité sous la forme de symbioses industrielles sur les territoires concernés. Ces symbioses pré-existantes doivent servir d'exemple pour modifier l'organisation du système industriel sur un territoire.

Le système industriel suisse peut déjà être considéré comme un écosystème industriel très développé. Le pourcentage de mise en décharge est faible et la plupart des déchets des entreprises sont valorisés. Néanmoins, l'évolution et la maturation du système sont aujourd'hui freinés par deux contraintes. Premièrement, la Suisse recourt trop fréquemment à la valorisation énergétique dans des installations dont le rendement énergétique n'est pas optimisé. Deuxièmement, marché libre du recyclage permet aux collecteurs et aux recycleurs de déchets de choisir une filière de valorisation uniquement sur la base de considérations économiques. Des filières plus efficaces environnementalement mais moins rentables économiquement sont ainsi parfois négligées.

Chapitre 5.

DISCUSSION ET CONCLUSION

5.1 INTRODUCTION

Les trois chapitres de recherches précédents ont permis d'aborder le fonctionnement actuel de l'écosystème industriel suisse, ainsi que les procédures et outils nécessaires pour favoriser sa maturation. En généralisant les conclusions du Chapitre 4, il est possible d'apporter plusieurs éléments de réponse en ce qui concerne l'impact potentiel du concept des symbioses industrielles sur l'organisation des activités économiques. Ce dernier chapitre a le double objectif de synthétiser les résultats et les conclusions des travaux réalisés et de proposer une réflexion sur l'évolution du système industriel dans son ensemble. Pour ce faire, les questions de recherche énoncées en introduction (Section 1.5) sont reprises dans le but d'apporter une réponse synthétique (Sections 5.2 à 5.4).

L'analyse des filières de valorisation des déchets des entreprises du Chapitre 4 a permis de conclure que des symbioses industrielles existaient déjà sur les territoires considérés. Cependant, la Suisse est fortement dépendante des importations de matières premières et de produits finis dont une proportion importante provient de la région Asie-Pacifique. Ces importations génèrent des impacts environnementaux conséquents dans d'autres régions du monde. La Suisse ne peut donc pas se contenter de limiter les impacts sur l'environnement des activités économiques sur son propre territoire. Ainsi, la deuxième partie de ce chapitre discute des opportunités de transposer les éléments procéduraux et les outils développés pour la Suisse dans le contexte asiatique (Section 5.4). L'objectif visé consiste à déplacer l'action dans le lieu géographique de production de la majorité des biens consommés en Suisse.

5.2 APPORTS POTENTIELS DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES AUX ACTIVITES ECONOMIQUES EN SUISSE

Cette section propose une réponse synthétique à la première question de recherche énoncée dans la Section 1.5. La description du système industriel suisse actuel nous a renseignés le devenir des déchets d'entreprises. Plusieurs des filières de collecte et de valorisation étudiées se sont révélées efficaces et rentables économiquement. Cependant le marché libre du recyclage, basé sur le principe du pollueur-payeur, n'incite pas toujours à une valorisation optimale des co-produits, sous-produits et produits résiduels. La législation en vigueur a favorisé l'essor d'entités de collecte et de valorisation des déchets qui permettent de minimiser la mise en décharge, et même de la supprimer pour certaines familles de flux, mais l'incinération et l'exportation de certains matériaux pouvant être recyclés et réutilisés font perdre au système industriel suisse des matières premières secondaires dont l'impact environnemental est inférieur à celui des matières premières importées. Pour des raisons économiques, ces considérations sont encore peu prises en comptes par les pouvoirs publics et les acteurs économiques.

Sur la base de ces constats, il a été possible de déterminer dans quels cas les symbioses industrielles offrent une alternative pertinente par rapport aux cheminements ou aux infrastructures existants.

Pour résumer les conclusions présentées dans la Section 4.5, le principal enjeu lié à l'industrie en Suisse porte sur la gestion de l'eau et de l'énergie. Les techniques disponibles existent pour étanchéifier les systèmes de production et de distribution en garantissant des retours sur investissement acceptables par les milieux économiques. Le deuxième grand enjeu concerne les matériaux inertes. Quantitativement, il s'agit du principal flux mis en décharge aujourd'hui. Or il est possible de réutiliser le béton issu de la démolition, l'argile des tuiles et certains sables utilisés dans divers secteurs de l'industrie, en particulier dans le travail des métaux, pour produire de la grave recyclée correspondant aux normes. Troisièmement, certains produits chimiques, comme l'acide phosphorique, l'acide sulfurique et le méthanol, peuvent être réutilisés, en particulier pour le traitement des eaux. Pour terminer, nous citerons encore les produits ligneux et les cendres de bois, réutilisables dans le secteur de la construction. Les détails des symbioses industrielles réalisables et pertinentes en Suisse ont été présentés au Tableau 32 et à la Figure 67.

Il est donc possible de répondre par l'affirmative à cette première question de recherche. Il existe un potentiel important pour les symbioses industrielles en Suisse. L'histoire et les habitudes culturelles et politiques du territoire ont une grande influence sur leur essor. Comme cela a été discuté dans la Section 2.6.4, les mécanismes cognitifs et structurels de la Suisse sont favorables pour les échanges d'informations et les collaborations. La Suisse est d'ailleurs très engagée dans la voie de l'écologie industrielle et les territoires étudiés peuvent d'ores et déjà être considérés comme des écosystèmes industriels. Au cours des cinq années passées sur le terrain en Suisse romande, nous avons ainsi découvert un nombre important de symbioses industrielles pré-existantes. Le nombre croissant de projets

liés à cette thématique ou qui s'apparentent au concept des collaborations inter-entreprises à l'échelle internationale appuie cette affirmation (Annexe 1).

La taille du pays et son système politique ne sont pas étrangers à cette situation. Le citoyen est fréquemment appelé à s'exprimer grâce aux mécanismes de la démocratie directe. Cette situation développe chez tous les acteurs un sentiment d'écoute et d'appartenance à une communauté. Cela favorise l'envie de parler et de collaborer. Parallèlement à cela, les politiques publiques suisses sont fortement structurantes, mais se positionnent également en partenaires des entreprises. Les services des administrations cantonales travaillent en collaboration avec les entreprises depuis des décennies et ne sont donc pas uniquement perçus comme des organes de contrôle et, en cas de non respect de la législation, punitif.

Les politiques publiques dans le domaine social ont également facilité l'essor de nouvelles solutions. L'économie sociale et solidaire tient un rôle important dans les écosystèmes industriels découverts à Genève et Lausanne Région. Elle peut assurer des tâches particulières qui permettent de réutiliser des biens et des matériaux. Certaines de ces activités, actuellement menées avec le soutien de l'Etat, sont donc créatrices d'emplois, même si ceux-ci sont subventionnés.

Ces éléments constituent des signes encourageants et sont une source de soutien importante pour les personnes en charge de concrétiser de nouveaux projets. Il convient néanmoins de rester prudent. Toutes les symbioses industrielles ne représentent pas un bilan environnemental optimal. Il est donc nécessaire d'identifier les expériences qui doivent être encouragées et celles qui doivent être évitées. Un système d'évaluation de la faisabilité et de la pertinence a donc été appliqué aux solutions proposées dans le Chapitre 4.

En conclusion, il est possible d'affirmer que la Suisse est déjà engagée sur la voie des symbioses industrielles et dispose d'un contexte favorable pour aller plus loin. Un enjeu important pour l'écologie industrielle est de s'inscrire encore plus dans les politiques publiques afin de devenir un lien entre l'aménagement du territoire, l'économie et la protection de l'environnement. La création d'une plateforme destinée à favoriser l'échange d'informations entre acteurs du territoire (Sections 2.7) et la prise en compte des flux de matière et d'énergie dans la planification du territoire (Section 3.5) représentent deux pistes de travail pour l'avenir.

Cependant, nous pourrions nous questionner sur le caractère significatif des solutions proposées précédemment à l'échelle globale. Dans la plupart des cas discutés dans le Chapitre 4, l'économie potentielle de ressources reste faible en regard de l'ensemble des ressources consommées par les territoires concernés. L'eau, l'énergie et les matériaux de construction sont les trois familles de flux qui présentent des potentiels importants et qui peuvent dans certains cas se chiffrer en plusieurs dizaines de pour cent d'économie. Les études de cas se basent uniquement sur 54 entreprises auditées dans le cadre des projets pilotes de Genève et de Lausanne Région et il est probable que des solutions significatives existent pour d'autres familles de flux. Néanmoins, l'ensemble des solutions détaillées dans cette recherche présente des bénéfices collatéraux non négligeables pour les entreprises (changements

organisationnels, prise de conscience de la problématique des ressources, communication des expériences réussies, etc.) qui peuvent permettre d'accélérer des changements plus importants.

La contribution effective des symbioses industrielles à l'économie de ressources est donc limitée dans le cas d'une économie en expansion. Même si elles permettent d'accroître l'éco-efficacité des activités économiques, il est malheureusement peu probable qu'elles soient à l'origine d'une diminution absolue de la consommation de ressources à l'échelle globale. A la lumière des éléments énoncés précédemment, il est possible d'affirmer que les symbioses industrielles constituent une direction à suivre, mais elles ne seront pas suffisantes pour résoudre les problèmes environnementaux liés à l'épuisement de certaines ressources.

5.3 PROMOTION DES SYMBIOSES INDUSTRIELLES ET SOUTIEN DES ENTREPRISES DANS LA MISE EN ŒUVRE

Comme indiqué en introduction, les symbioses industrielles mettent beaucoup de temps à se développer d'elles-mêmes. Il convient maintenant de répondre à la deuxième question de recherche en résumant les développements théoriques destinés à détecter, analyser et faciliter la mise en œuvre de symbioses industrielles dans des délais raisonnables.

Deux enjeux principaux ont été identifiés dans le Chapitre 2 et le Chapitre 3. Premièrement, il s'agit de détecter les potentiels de symbioses industrielles, de les analyser puis de convaincre les entreprises de modifier leurs habitudes. Deuxièmement, les pouvoirs publics ont un rôle important à jouer en créant les conditions adéquates pour accompagner les entreprises dans ces changements et ainsi favoriser un développement éco-industriel.

5.3.1 Synthèse des enjeux de la détection, analyse et mise en œuvre dans les entreprises

Les procédures d'action sur le terrain développées dans la Section 2.5 pour soutenir les entreprises désireuses de mettre en œuvre des symbioses industrielles peuvent être résumées en quatre étapes.

La première phase implique pour la personne en charge du projet un apprentissage du contexte local par l'intermédiaire d'un diagnostic économique et institutionnel du territoire considéré. La connaissance de la législation en vigueur, les analyses de flux de matière et d'énergie et la détection des bonnes pratiques et des symbioses industrielles pré-existantes sont autant d'éléments qui ont un impact positif sur la réussite d'un projet. Lorsqu'un projet est mené ou réalisé sous l'égide d'une administration locale, certains de ces éléments sont déjà connus.

La deuxième phase proposée consiste en une analyse de la répartition spatiale des activités économiques présentes sur le territoire en identifiant les principales concentrations d'activités, les secteurs d'activité présents et les plus importants consommateurs de ressources ainsi qu'en révélant les ressources endogènes exploitables. Ces travaux sont réalisés conjointement à la première phase principalement lorsqu'une analyse de flux de matière et d'énergie est réalisée sur le territoire considéré.

La troisième phase concerne l'organisation d'une campagne d'information et de sensibilisation par l'intermédiaire des organes porteurs du projet. Une étape consiste en l'organisation de conférences et d'ateliers thématiques en présence d'experts pour détecter les premières opportunités de collaboration à partir des connaissances du territoire et d'une base de données des symbioses industrielles réalisables.

La quatrième phase regroupe deux objectifs qui peuvent être réalisés conjointement. Le premier concerne l'introduction du concept dans l'action publique en formant des acteurs locaux et en intégrant des éléments de soutien dans les politiques publiques. En parallèle, des audits des flux de matière et d'énergie d'entreprises situées dans des zones d'activités à fort potentiel peuvent être envisagés afin de détecter de nouvelles symbioses industrielles. Ces évaluations des chaînes de production permettent d'acquérir des données plus complètes pour évaluer la faisabilité technique d'un échange et mieux accompagner les entreprises dans la mise en œuvre.

Le premier atout des quatre phases décrites précédemment repose sur l'amélioration de l'analyse préalable du territoire pour détecter les zones à fort potentiel et les ressources endogènes disponibles de manière approfondie. Le second avantage consiste en la réduction de l'investissement des entreprises dans les premières phases d'un projet, afin de se concentrer sur la reproduction de bonnes pratiques existantes et sur les possibilités d'optimisation interne. En évitant la collecte de données exhaustives dans les premières phases d'un projet elle permet de ne pas mettre les acteurs économiques à contribution avant de pouvoir garantir des solutions prometteuses. Cette solution présente cependant le risque de ne pas identifier une solution potentielle spécifique à une entreprise dès le début d'un projet. Mais, lorsque cela est pertinent, elle facilite la collecte d'informations dans un deuxième temps. Finalement, elle permet d'introduire les symbioses industrielles dans les politiques publiques, facilitant ainsi le rôle d'un coordinateur de terrain.

Les contraintes liées au morcellement institutionnel et politique du territoire suisse doivent également être prises en compte. Les études de cas réalisées traitent de territoires de petite taille, à l'échelle institutionnelle du canton ou du groupement de communes. Les acteurs économiques partagent alors la même culture et la majorité d'entre eux ont la même perception de la problématique environnementale (pour plus de détails, se référer à la Section 2.2.1 traitant des mécanismes cognitifs et culturels). Le même constat peut être fait à l'échelle des fortes concentrations d'activités, comme c'est le cas dans les zones industrielles. Les liens sociaux entre acteurs sont alors plus intenses et les mécanismes cognitifs sont plus faciles à appréhender. L'existence d'associations d'industriels et l'historique des collaborations autour de la gestion de la zone fait qu'un lien de confiance existe la plupart du temps déjà et peut servir de déclencheur important dans toutes les phases d'un projet. L'échelle d'action la plus recommandée pour commencer un projet est donc celle de la zone industrielle. Cette échelle géographique maximise également les possibilités de symbioses dans les domaines de l'eau et de l'énergie.

En Suisse, les activités économiques sont de taille modeste, en majorité des petites et moyennes entreprises, et de nombreux liens existent entre des entreprises de différents cantons par l'intermédiaire d'associations de branches ou de consultants spécialisés dans un domaine précis. Ainsi, s'il est important de travailler sur des fortes concentrations d'activités pour certains flux, il est également pertinent de travailler à une échelle plus étendue. En Suisse romande, l'approche intercantonale semble la plus prometteuse pour la diversité des activités économiques, parfois réunies en cluster, mais surtout à cause de leur diffusion sur l'ensemble du territoire.

La barrière mentionnée ici est donc géographique et liée à l'histoire économique du territoire. Il en existe d'autres : techniques, légales, environnementales et économiques. Elles ont été abordées en détail dans la Section 2.4. Il conviendrait encore d'ajouter à ces quatre paramètres un critère concernant l'organisation interne de l'entreprise. Celui-ci n'a été traité que partiellement dans la Section 2.6.4. Pour bien comprendre de quoi il s'agit, il est nécessaire de revenir à des considérations économiques. Lorsqu'une entreprise a mis en œuvre les solutions ayant un retour sur investissement court, les projets plus ambitieux se heurtent à des considérations financières. Pour faciliter le changement des habitudes et inciter une entreprise à investir, il est donc important d'identifier la plus-value économique de la solution proposée par rapport à la filière de valorisation existante et de la communiquer à l'entreprise. Le modèle de coûts/bénéfices développé dans la Section 2.4.3 n'est cependant parfois pas suffisant pour déclencher une réaction. Certaines opportunités peuvent ne pas aboutir car la solution de prise en charge du flux représente déjà un optimum économique et environnemental dans le contexte économique actuel et selon le point de vue des organes de décision. Il y a donc nécessité de mieux comprendre le fonctionnement du management interne d'une entreprise. Dans certains cas, les acteurs économiques et les entités de collecte et de valorisation des déchets ne voient pas l'intérêt d'agir de manière préventive afin de changer leurs habitudes. L'efficacité des filières de recyclage peut donc être un autre handicap pour la mise en place de symbioses industrielles. Dans le contexte actuel, les difficultés organisationnelles qu'implique la mise en œuvre de certaines symbioses industrielles à l'interne de l'entreprise incitent les industriels à rejeter la responsabilité et les risques sur les entités de collecte et de valorisation des déchets.

De plus, une critique fréquente des symbioses industrielles concerne le risque de défection d'un ou de plusieurs partenaires d'une collaboration. Il existe effectivement un risque de démembrement d'un réseau d'échange de co-produit ou d'une mutualisation lorsqu'un ou plusieurs partenaires font défaut, pour cause de déménagement, de changement de production ou de disparition. Si cette remarque est pertinente, il n'en reste pas moins que, comme dans les écosystèmes naturels, le tissu industriel d'un territoire s'adapte aux changements. Les contrats entre entreprises destinés à définir les tâches, les responsabilités et les coûts dans le cas des symbioses industrielles ne sont pas différents de ceux qui existent habituellement entre clients et sous-traitants.

Au sein des activités économiques, tout change très vite, une entreprise se déplace ou disparaît et une autre apparaît. Lorsqu'un sous-traitant disparaît, l'entreprise en trouve un autre. Il en va de même dans la nature. Au sein d'un écosystème naturel, les organismes bougent et leur population évolue. Un écosystème est en constante évolution. Les organismes collaborent dans la nature sous forme de symbioses lorsque les conditions extérieures le demandent et cette collaboration se termine un jour ou l'autre. Ainsi, le changement est continu et inévitable dans les écosystèmes comme dans l'économie. Les entreprises sont les mieux placées pour s'adapter. Le tissu économique d'un territoire ne sera jamais figé et dès lors, cet argument doit être dépassé pour permettre l'essor des symbioses industrielles.

L'enjeu consiste donc à amener l'entreprise à comprendre l'intérêt d'investir aujourd'hui pour modifier son organisation afin de réduire sa dépendance aux ressources non renouvelables, mais également

renouvelables. Ces éléments, détaillés dans la Section 2.6.4 concernant la perception des symbioses industrielles par les entreprises, sont repris dans l'Annexe 5 traitant des perspectives de recherche.

5.3.2 Favoriser le développement éco-industriel en Suisse

Comme nous l'avons énoncé à plusieurs reprises, les collectivités publiques ont un rôle important à jouer pour orienter l'évolution des habitudes des entreprises et l'organisation des activités économiques. Nous avons longuement discuté dans ce travail de la dispersion spatiale des activités économiques sur un territoire. Un éloignement trop important entre deux activités économiques qui peuvent potentiellement collaborer est un handicap pour la mise en place d'un échange de co-produit ou d'une mutualisation. Sur les territoires étudiés, comme sur l'ensemble du plateau suisse, la situation est particulière. Il s'agit d'un territoire de petite taille, fortement urbanisé et l'utilisation du sol y est très fragmentée. L'industrie côtoie étroitement l'habitat et l'agriculture. Cette situation est à double tranchant : d'un côté elle favorise la mise en place de certains types d'échanges de flux entre différents secteurs d'activité, mais elle empêche parfois les collaborations entre d'importants consommateurs de ressources trop dispersés sur le territoire pour prendre part à une mutualisation de leurs moyens de production.

Pour favoriser l'essor de symbioses industrielles, il apparaît judicieux d'influencer le choix de l'emplacement d'une nouvelle activité. Actuellement, lors de changements d'affectation de parcelles et de l'élaboration de futures zones de développement, les flux de matière et d'énergie sont très peu pris en considération. Or, les études menées par le groupe de travail Ecosite ont montré que certaines activités pouvaient être positionnées sur le territoire en fonction des ressources endogènes disponibles et que certaines concentrations d'entreprises présentaient, par exemple, des potentiels pour une utilisation en cascade de l'eau (Carvalho et Massard 2010). A Genève toujours, le ScanE s'attèle à cette tâche depuis plusieurs années par l'intermédiaire de la planification énergétique territoriale (Section 4.4.12.1).

Un développement éco-industriel implique ainsi des actions de planification liées à l'aménagement du territoire, à la promotion économique, à l'urbanisme et aux équipements. Actuellement, l'organisation des activités économiques sur un territoire est le fruit de négociations entre les pouvoirs publics, à différentes échelles, et les acteurs du secteur privé, les communes et les cantons souhaitant l'arrivée de nouveaux contribuables. A l'exception du cas de Genève, ce sont d'ailleurs les communes qui définissent l'affectation du sol et donc des parcelles destinées aux activités économiques et en particulier à celles du secteur secondaire. Le principal service public en charge de ces questions est le service d'aménagement du territoire dont le rôle est de déterminer les usages autorisés sur chaque catégorie d'occupation du sol. Il définit donc le positionnement des zones industrielles et des zones de développement. Les zones industrielles regroupant des activités du secteur secondaire sont ainsi fractionnées, dispersées sur le territoire de nombreuses communes et côtoient d'autres activités comme l'agriculture, le logement et les espaces de détente.

L'enjeu consiste à intégrer les connaissances liées aux flux de matière et d'énergie dans les tâches liées à l'organisation du territoire. Le logiciel SymbioGIS s'est révélé être un outil prometteur pour intégrer les connaissances des flux de matière dans ces décisions et pour orienter les développements futurs d'un territoire à forte mixité vers un écosystème industriel. Les hypothèses proposées dans la Section 3.1.3 ont été confirmées par les développements réalisés et leur application à l'étude de cas de Genève. SymbioGIS est un outil pertinent pour la problématique de cette recherche et les résultats obtenus pour Genève sont généralisables et transposables à d'autres territoires moyennant une adaptation au contexte.

SymbioGIS s'est par ailleurs surtout révélé pertinent pour les familles de flux eau et énergie, soit les flux qui représentent les potentiels les plus importants en Suisse, mais qui demandent une grande proximité géographique entre les activités concernées. La plus value de cet outil par rapport aux interfaces cartographiques disponibles dans les administrations publiques se trouve dans la possibilité de lier des bilans de flux de matière et d'énergie aux entités légales du territoire. Il s'agit d'une couche d'information supplémentaire disponible pour orienter les prises de décisions.

Le morcellement administratif du territoire est donc un obstacle à certaines collaborations. Les cantons et les communes ont de très fortes prérogatives en matière de planification territoriale et de gestion des déchets urbains. Or les frontières cantonales et communales n'arrêtent pas les transferts des matières premières et des co-produits d'entreprises. Les systèmes d'information géographique existants ne permettent pas, à l'heure actuelle, de mettre en relation des activités économiques situées sur plusieurs cantons. Ainsi la mise en place d'une plateforme d'échange d'informations et de collaboration sous la forme d'une structure d'accompagnement pour l'émergence de symbioses industrielles en Suisse romande semble pertinente. En y intégrant une interface comme SymbioGIS, elle pourrait faciliter les échanges d'informations entre communes et cantons sur les flux de matière et d'énergie et contribuer à un développement économique plus respectueux de l'environnement. En résumé, les domaines de compétences de la plateforme, détaillés dans la Section 2.7.2, sont la centralisation et la mise à disposition d'informations sur les expériences de symbioses industrielles en Suisse et dans le monde, l'aide à la détection de nouvelles opportunités, l'accompagnement technique des projets jusqu'à leur mise en place ainsi que la diffusion et la valorisation des expériences romandes en Suisse et à l'étranger.

Si l'aménagement du territoire est une composante importante, les organes de promotion du territoire ont cependant également un rôle à jouer. Les pouvoirs publics sont en relation avec les entités économiques souhaitant s'installer dans leurs limites administratives. Or, dans une économie de plus en plus tournée vers le savoir, nous pouvons nous poser la question suivante : Pourquoi une entreprise s'installe-t-elle à un endroit précis ? Les domaines de recherche de la science régionale, de la logistique et de la gestion des chaînes d'approvisionnement ont d'ailleurs développé des modèles théoriques destinés à aider les entreprises dans leur choix (Berliant et ten Raa 1994; Florida 1995; Fernández et Ruiz 2009; Griffith, Redding et al. 2009; Melo, Nickel et al. 2009). Ainsi, tout ce travail s'intègre très bien dans le cadre plus large de la science régionale qui peut apporter des éléments de réponse à cette question. Selon Berliant et ten Raa (1994) :

La science régionale est un pannel d'outils multidisciplinaires utilisés pour des enjeux macroscopiques comme la production de biens et l'emploi entre les régions. [...] La science régionale à le potentiel d'expliquer simultanément l'offre et la demande en matières premières et en produits, ainsi la localisation de tous les agents [producteurs et consommateurs] par région, appelés problèmes de localisation et d'allocation. ⁵⁸

De manière générale, la science régionale a pour sujet les méthodes d'analyses régionales et spatiales, le développement régional et les politiques publiques (Isserman 2001). Plus précisément, elle étudie les disparités entre les régions en terme d'allocation des ressources et du savoir en étudiant la localisation des activités de production (secteur secondaire), la localisation des consommateurs et celle des infrastructures publiques, ainsi que l'équilibre de leur répartition sur un territoire, en lien avec les particularités du système économique du territoire considéré (Berliant et ten Raa 1994).

Dans la plupart des cas, la science régionale est fortement influencée par des théories économiques en lien avec l'économie régionale. Ce n'était cependant pas le cas en Suisse au début des années quatre-vingts (Hanser 1983). Nous reviendrons par la suite sur cette affirmation en lien avec la nouvelle politique régionale (NPR) de la Suisse.

Un lien peut également être établi entre les symbioses industrielles et la gestion du savoir, l'un des domaines de la science régionale. Richard Florida (1995) suggère que les régions sont un élément clé pour la gestion des connaissances :

Les régions sont en train de devenir les points centraux de la création de connaissances et de l'apprentissage dans ce nouvel âge de capitalisme global et très orienté sur les connaissances, comme si elles devenaient des régions du savoir. Ces régions du savoir deviennent les réceptrices et les dépositrices du savoir et des idées, et créent un environnement et des infrastructures qui facilitent les échanges de connaissances et d'idées, ainsi que l'apprentissage. ⁵⁹

Selon Florida, la gestion du savoir dans notre économie globalisée va bien au-delà des stratégies de management à l'échelle de l'entreprise individuelle et implique le développement d'infrastructures (liées à la gestion du savoir et à l'enseignement) à l'échelle régionale sur lesquelles les entreprises puissent

⁵⁸ Traduction de l'auteur selon (Berliant et ten Raa 1994) :

Regional science is a multidisciplinary tool box used to address macro issues such as the détermination of output and employment across regions. [...] Regional science has the potential to explain simultaneously the supply of and demand for commodities as well as the locations of all agents by region, called « location-allocation » problems.

⁵⁹ Traduction de l'auteur selon (Florida 1995) :

Regions are becoming focal points for knowledge creation and learning in the new age of global, knowledge-intensive capitalism, as they in effect become /earning regions. These learning regions function as collectors and repositories of knowledge and ideas, and provide the underlying environment or infrastructure which facilitates the flow of knowledge, ideas and learning.

s'appuyer. Ce concept des régions du savoir, destiné à l'apprentissage collectif à l'échelle du territoire, est donc en phase avec celui des symbioses industrielles et de l'apprentissage organisationnel qu'elles demandent.

Ainsi, une entreprise choisit principalement son lieu d'implantation en fonction du prestige du territoire considéré, des formations et des compétences disponibles, des coûts ou du centre de gravité de ses clients. Dans le secteur secondaire, la problématique générale du positionnement d'une entité économique traite de la répartition spatiale d'unités locales destinées à répondre à la demande de clients répartis sur un territoire parfois très vaste. En général, les modèles développés pour planifier l'implantation d'une entité se basent sur la minimisation des coûts de transport liés à l'approvisionnement des clients et sur les coûts liés à l'installation des infrastructures. Plus récemment, un nouvel élément a fait son apparition. Le domaine de la logistique de désapprovisionnement (rétrologistique) étudie les filières de collecte et/ou récupération de produits réintégrant la chaîne d'approvisionnement (Figure 68). Le retour des produits en fin de vie vers des entreprises du secteur secondaire, des sous-traitants ou des centres de distribution, par l'entremise d'intermédiaires, devient un élément à prendre en compte. Son développement est justifié par des impératifs d'ordre économique, ainsi que par les pressions de la législation environnementale et des consommateurs (Melo, Nickel et al. 2009).

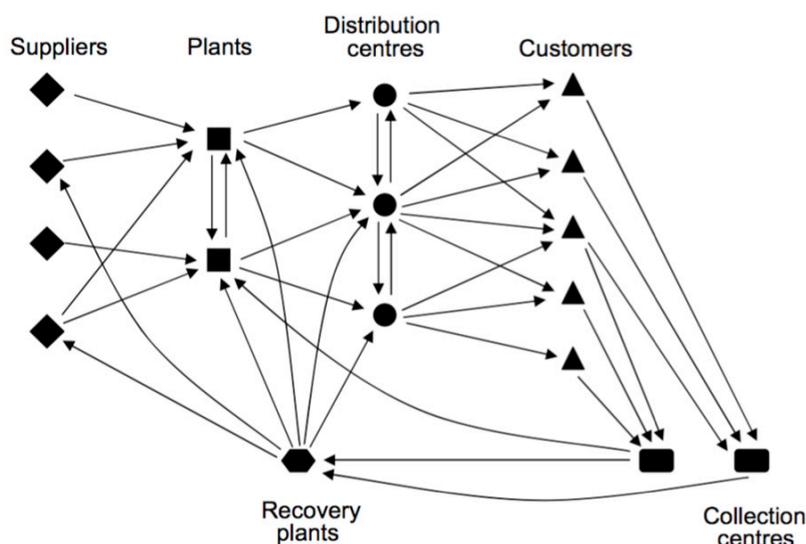


Figure 68 : Modélisation d'une chaîne d'approvisionnement incluant la rétrologistique. Source : (Melo, Nickel et al. 2009).

Cependant, la valorisation des co-produits, sous-produits et produits résiduels ainsi que les possibilités offertes par la mutualisation d'approvisionnement sont encore faiblement prises en compte. Seuls certains secteurs d'activité s'y intéressent aujourd'hui. Par exemple, les grands acteurs techniques d'internet

cherchent à implanter leurs serveurs à proximité de sources importantes d'énergies renouvelables et en particulier géothermiques ou hydrothermiques. De la même manière, les cimentiers achètent ou obtiennent des baux à long terme pour des sites d'extraction de ressources et construisent les activités de production de ciment sur place plutôt que de transporter les minéraux non transformés. Ils sont alors plus loin de leurs clients, mais les tonnes-kilomètres parcourues pour l'ensemble du cycle de production sont ainsi largement réduites. Les symbioses industrielles apparaissent ainsi comme un nouvel argument à prendre en compte lors du positionnement des zones industrielles et de toutes les activités économiques désireuses de s'y installer.

A titre d'exemple, il serait possible de proposer une liste des proximités entre activités intéressantes pour favoriser un développement éco-industriel, sur la base d'une interface cartographique comme celle proposée par SymbioGIS. Cependant, la fonctionnalité permettant de conseiller les entreprises sur la position géographique pour une nouvelle activité est inexistante dans la version actuelle du programme. Elle pourrait être développée en se basant sur des travaux réalisés en Espagne (Fernández et Ruiz 2009). Les solutions proposées ne devront toutefois pas inciter à une planification trop contraignante. Elles sont d'ailleurs envisageables sans remettre profondément en cause la notion de zonage (LAT 1979). Cette proposition remet par contre partiellement en cause la grande liberté dont bénéficient les acteurs économiques en termes de choix d'implantation. Des actions de sensibilisation seront nécessaires d'une part auprès des services de promotion économique et d'autre part auprès des entreprises elles-mêmes. Cette idée est reprise dans l'Annexe 5 traitant des perspectives de recherche appliquée.

5.3.2.1 Le rôle de la promotion économique

Il est intéressant de constater que les services de promotion économique ont un rôle à jouer, ils s'intéressent à l'écologie industrielle pour aider les entreprises déjà présentes sur le territoire, ce qu'on appelle la promotion endogène, mais également pour promouvoir le territoire et attirer de nouvelles entreprises, soit la promotion exogène. Certains de ces organismes commencent à comprendre qu'il est plus pertinent d'attirer des entreprises dont la consommation de ressources est compatible avec le territoire considéré. L'essor en Suisse du concept des technologies propres, ou Cleantech, le prouve.

A Genève, le service de promotion économique a la tâche d'attirer de nouvelles entreprises des secteurs tertiaire et secondaire, afin de maintenir la croissance économique du canton et d'en faire un pôle d'affaires international encore plus visible. Or, les zones industrielles du canton sont saturées, et même si des possibilités de densification existent, cette politique économique se fait parfois au détriment de la qualité de vie des citoyens et de l'environnement. Les infrastructures, qui n'ont pas été développées de manière suffisante ces dernières décennies, en lien avec la configuration du territoire, induisent des problèmes d'encombrement importants, qui eux-mêmes entraînent une augmentation des impacts sur l'environnement et la santé humaine. Genève ne dispose sur son territoire que d'une petite partie des ressources nécessaires à son économie. Le constat reste le même si l'on considère l'agglomération

franco-valdo-genevoise. Le développement éco-industriel peut apporter certaines réponses pour mieux organiser les activités existantes et en positionner de nouvelles de manière à réduire les impacts. Il ne peut cependant pas éviter le débat sur les limites du développement d'un territoire soumis à forte pression et dont les ressources disponibles sont connues, maîtrisées, mais insuffisantes pour garantir une croissance à long terme sans fortement porter atteinte à la qualité de vie des citoyens.

Dans le cas du Valais, la situation est différente, l'organisme de promotion économique qui gère actuellement un projet d'écologie industrielle, montre une volonté ferme d'attirer de nouvelles entreprises en se basant sur les principes du développement éco-industriel. Au début du siècle dernier, l'émergence de l'hydroélectricité a fait que de nombreuses entreprises sont venues s'installer dans ce canton. Les entreprises étaient attirées par l'accès facile à cette source d'énergie. Aujourd'hui, la globalisation de l'économie et le déplacement des pôles de croissance vers les pays émergents font que certaines activités industrielles ont été délocalisées. Le service de promotion économique souhaite aujourd'hui à nouveau utiliser l'abondance des ressources comme l'eau et des énergies renouvelables comme l'hydroélectricité et la biomasse pour attirer de nouvelles entreprises.

En conclusion, l'aménagement du territoire et la promotion du territoire ont un rôle évident à jouer pour apporter des éléments de réponse concrets à ces préoccupations et créer réellement un développement éco-industriel. En d'autres termes, il s'agit d'ajouter la dimension des flux de matière et d'énergie lors des phases d'implantation d'une nouvelle activité (remaniement parcellaire ou projets de changement d'affectation de zones) et dans la promotion économique du territoire afin de maîtriser la consommation de ressources. Des recherches plus approfondies devraient être menées dans ce domaine. Elles sont reprises dans les propositions de recherche en Annexe 5.

Mais une promotion économique basée sur les principes du développement éco-industriel peut également contribuer à attirer de nouvelles activités économiques. Il semble donc important de garder en tête que l'objectif premier des symbioses industrielles est de rendre le système industriel considéré plus durable et de réduire ses impacts sur l'environnement et non de créer de nouvelles entreprises dont les activités génèrent de nouveaux impacts. Une partie de l'intérêt important pour l'écologie industrielle actuellement en Suisse romande vient des acteurs de l'économie et des organismes en charge de la promotion du territoire qui y voient un moyen de rendre ce dernier plus attractif en mettant en avant ses ressources naturelles et les expériences réussies de certaines entreprises. Il existe cependant un risque de récupération de l'écologie industrielle et des symbioses industrielles à des fins de promotion économique uniquement, comme vitrine environnementale pour attirer de nouvelles activités économiques. Il est vrai que l'écologie industrielle s'allie bien avec le concept de développement économique et elle est en général bien accueillie par les milieux économiques. Cependant, elle propose un vrai changement. Au premier abord, les procédures comme les symbioses industrielles sont attractives pour les milieux économiques car elles ne sont pas issues d'un milieu militant. Ce constat est important pour stimuler les milieux économiques. Elles proposent malgré tout un changement et les acteurs qui entrent dans ce processus se voient proposer petit à petit des solutions qui remettent profondément en cause le mode de

fonctionnement de l'entreprise. Les symbioses industrielles peuvent donc être perçues comme un cheval de troie, pour rendre les entreprises plus attentives à leur environnement économique et naturel.

Ces considérations peuvent de plus devenir problématiques si le développement éco-industriel est partiel et s'il s'applique uniquement au territoire suisse. Des contraintes environnementales trop restrictives incitent les entreprises du secteur de la production à s'installer dans d'autres régions du monde. Or, un pays ne devrait pas rejeter la pollution hors de ses frontières. Dans tout les cas, il devrait travailler sur l'ensemble du cycle de vie des produits nécessaires à sa population. Pour cette raison, il semble pertinent d'intensifier les collaborations et les échanges avec les pays extracteurs de ressources et producteurs des biens de consommation vendus en Suisse. Nous y reviendrons dans la Section 5.5 traitant de la transposition des procédures dans le contexte asiatique.

5.3.2.2 *La nouvelle politique régionale de la Suisse*

En Suisse, la nouvelle politique régionale (NPR) va dans le sens d'une économie des régions. Elle est développée et gérée par le Département de l'économie qui la définit ainsi (SECO 2008) :

La politique régionale de la Confédération soutient les régions rurales, de montagne et frontalières par la mise en œuvre de différents programmes de développement. La gestion reste de la compétence des cantons qui, en coopération avec les régions intéressées, mettent au point des stratégies en vue de renforcer leur économie.

Il s'agit d'une politique transversale qui cadre le développement des régions et la politique des agglomérations de la Confédération pour faire face aux changements structurels de l'économie. Elle a pour but de stimuler l'innovation, de générer de la valeur ajoutée et d'améliorer la compétitivité dans les régions rurales, de montagne et transfrontalières afin de contribuer à la création et au maintien d'emplois dans ces zones. Ainsi, la Confédération soutient les régions qui développent leurs propres idées et qui initient leurs propres projets. Pour la période 2008 – 2015, elle a débloqué 230 millions de francs, distribués sous forme de prêts, d'allègements fiscaux ou de contributions à fonds perdus. Cependant, ce sont les cantons qui jouent un rôle clé dans la conception, le financement et la mise en œuvre des projets en développant, au sein d'équipe de projet, des stratégies concrètes pour la promotion de l'économie régionale. La Confédération propose les trois volets suivants :

1. Renforcer l'économie dans les régions à travers le développement des innovations et une économie orientée vers le marché ;
2. Coordonner la politique régionale avec les offices fédéraux qui soutiennent également des projets dans les zones rurales afin de créer des synergies dans les domaines de l'innovation, de la formation, de l'agriculture, de l'environnement, de l'énergie, du tourisme, des PME et de la promotion économique ;

3. Compiler et évaluer les connaissances touchant au thème du développement régional afin que les personnes responsables puissent utiliser ce savoir pour développer, mettre au point et commercialiser des produits et des services.

Pour définir des projets, les cantons doivent étudier et s'appuyer sur les ressources à disposition : forces économiques, matières premières et industrie déjà établie. La NPR ne soutient que des projets compatibles avec les principes du développement durable.

Il faut relever que les cinq agglomérations les plus importantes du pays (Zurich, Genève, Bâle, Berne et Lausanne) ne peuvent pas obtenir de soutien financier. Cette décision est aujourd'hui critiquée car elle enlève à ces régions, qui sont également les principales régions économiques du pays et qui concentrent de nombreuses infrastructures dédiées à l'enseignement et à la recherche, la motivation de collaborer avec les régions périphériques.

Voici deux exemples de projets soutenus par la NPR :

- Dans le domaine de l'énergie, qui compte parmi les biens d'exportation les plus importants pour les régions rurales. Le secteur des énergies renouvelables permet aux petites et moyennes entreprises de s'ouvrir de nouveaux marchés à condition de privilégier une haute spécialisation, l'échange réciproque et la formation continue, comme à Lucerne, par exemple, où l'industrie du bois souhaite se repositionner. Le matériau bois joue, à cet égard, un rôle important en tant que source d'énergie. Des entreprises issues de tous les secteurs de cette branche se sont ainsi associées au projet «La plus-value bois».
- Dans le domaine des ressources naturelles, des paysages entretenus de manière écologique peuvent favoriser le développement économique d'une région lorsque des investisseurs publics et privés mettent au point un nouveau concept. Ainsi, la mise en réseau du tourisme, de l'agriculture et des arts et métiers pour promouvoir un parc naturel ou une réserve de biosphère. La réserve de l'Entlebuch et ses biotopes marécageux, ses prés fleuris et ses champignons constituent autant d'atouts pour attirer les touristes. Des producteurs de denrées alimentaires, des scieries et des hôtels se sont ainsi réunis sous un même label, celui de la réserve, pour proposer leurs produits et services (SECO 2008).

Pour favoriser l'essor de projets concrets, la Confédération favorise le travail en réseau et l'échange de savoir-faire en mettant à disposition des différents acteurs, par l'intermédiaire d'internet, les connaissances théoriques et pratiques dont ils ont besoin.

Nous pouvons dès lors affirmer que l'écologie industrielle, en rapprochant économie, environnement et aménagement du territoire, correspond tout à fait aux critères de la NPR, en contribuant à un développement économique plus harmonieux. Aujourd'hui, les projets pilotes de symbioses industrielles

de Genève et de Lausanne Région n'entrent pas dans le cadre de la NPR. Cependant, des projets sont également en cours dans le canton du Valais et depuis 2010, dans ceux de Vaud et de Fribourg. Le projet de plateforme romande sur les symbioses industrielles, destiné à mettre à disposition des entreprises des retours d'expériences sur les projets réussis et à tisser un réseau intercantonal sur la question de la gestion des ressources (Section 2.7.2), remplit parfaitement les objectifs fixés par la NPR pour soutenir des projets, en alliant développement, innovation et environnement. En particulier, la plateforme permettra au plus grand nombre d'entreprises de créer des liens entre acteurs économiques et contribuera à proposer des solutions pour mieux s'intégrer dans l'environnement. La responsabilité de mise en œuvre de cette politique est du ressort des cantons. Ceux-ci auraient donc tout intérêt à collaborer dans le domaine de la gestion des ressources.

5.4 PERSPECTIVES POUR ACCELERER LA TRANSITION VERS UN ECOSYSTEME INDUSTRIEL

La troisième question de recherche porte sur la capacité des symbioses industrielles à modifier en profondeur le fonctionnement du système industriel pour le rendre viable sur le long terme. Les deux sections précédentes ont permis de synthétiser les solutions développées dans ce travail pour favoriser l'essor des symbioses industrielles et leur introduction dans les décisions liées à l'organisation du territoire dans le but d'initier un développement éco-industriel. Pour clore cette recherche, il nous semble intéressant d'étudier quelques pistes plus imaginatives. L'objectif de cette section est donc d'élargir la réflexion sur l'organisation des activités économiques. De nombreux programmes de soutien et d'incitation sont en cours pour essayer de rendre ces dernières plus efficaces et moins dangereuses pour notre environnement. Cependant, la plupart des éléments présentés dans ce travail sont destinés à améliorer le système en place sans le remettre en question en profondeur.

L'écologie industrielle peut servir de concept pour déterminer le degré de compatibilité entre les activités économiques et les écosystèmes naturels. L'objectif ici n'est cependant pas de rentrer dans un discours sur la durabilité des fondements politiques, économiques et éthiques de nos activités économiques actuelles. Ces considérations sortent du cadre de ce travail. Nous mentionnons simplement ici que le concept d'écologie industrielle peut être compris ou appliqué à plusieurs échelles ou degrés d'intensité. Nous distinguerons ici deux niveaux :

1. Les activités humaines doivent être parfaitement intégrées dans les écosystèmes naturels. Cela signifie que l'être humain ne doit pas les modifier en profondeur ni leur porter atteinte sur le long terme. Les services d'origine écosystémique, comme l'air, l'eau et la biodiversité, permettant de répondre à ses besoins vitaux, sont alors produits uniquement par des écosystèmes pas ou peu modifiés par l'être humain. Dans un tel environnement, l'extraction des ressources non renouvelables du sous-sol ne devrait pas être autorisée. Ce modèle est alors proche de celui du chasseur-cueilleur présent sur notre planète il y a plusieurs centaines de milliers d'années lorsque la population était bien moins importante qu'aujourd'hui. Ce modèle est défendu par un grand nombre d'organisations qui militent pour la protection de l'environnement. Il correspond à un mode de fonctionnement vers lequel devrait tendre notre économie (en faisant volontairement fi ici des considérations démographiques).

Cependant, il n'est pas imaginable de changer l'ensemble des fondements de l'organisation actuelle des activités industrielles modernes du jour au lendemain. Un grand nombre de celles-ci sont nécessaires à notre bien-être et garantissent une rémunération à un grand nombre d'êtres humains (en négligeant ici volontairement la question des inégalités sociales).

2. L'écologie industrielle apporte également des solutions pour améliorer les activités économiques existantes afin de, petit à petit, les rapprocher du fonctionnement des écosystèmes naturels.

Cela signifie qu'il est souhaitable de réduire la quantité de ressources naturelles consommées par unité de bien produit. Pour cela, des solutions comme l'éco-design, la production plus propre ou les symbioses industrielles existent. De la même manière, le développement éco-industriel pour les activités économiques existantes et pour celles qui souhaitent s'installer sur un territoire est un objectif louable si les quatre principes de l'éco-restructuration proposés par Suren Erkman en 1998 (valoriser les déchets comme des ressources, boucler les cycles de matières et minimiser les émissions dissipatives, dématérialiser les produits et les activités économiques, décarboniser l'énergie) sont respectés. Ils représentent une manière efficace de promouvoir le territoire en respectant ses limites.

Pour dépasser ces considérations et aller plus loin, les principaux acteurs du changement restent les entreprises (le citoyen et ses choix de consommation ne sont pas considérés dans le cadre de cette recherche). Or la majorité d'entre elles, à l'exception des grandes entreprises multinationales et de certaines petites et moyennes entreprises intégrant l'éco-design dans leurs produits, se préparent peu à l'épuisement de certaines ressources primordiales pour leurs activités. Elles seront donc fortement touchées par la transition industrielle en cours, ce qui entraînera des effets sociaux non négligeables.

Il est possible d'aller plus loin afin de transformer des projets techniques intéressants, mais loin des préoccupations actuelles des entreprises, en des projets stratégiques pour l'avenir de l'entreprise. En observant les écosystèmes naturels, nous remarquons qu'elle a trouvé différentes manières de pallier certains manques.

Comme nous l'avons expliqué en introduction de cette recherche, dans la définition stricte de la symbiose, les deux symbiotes ne peuvent survivre l'un sans l'autre. Les avantages et/ou inconvénients sont alors réciproques et partagés entre les organismes. Ce n'est pas le cas des symbioses industrielles telles que nous les avons traitées dans ce travail. En principe, chaque entreprise peut survivre individuellement et même trouver une nouvelle source d'approvisionnement lorsqu'une collaboration cesse.

Dans les écosystèmes naturels, d'autres types de collaboration se sont développés correspondant à différents cas de figure. En introduction, nous avons mentionné certaines légumineuses qui vivent en symbioses avec des bactéries capables de fixer l'azote atmosphérique, les Rhizobiums. La plante accepte les Rhizobiums lorsque la teneur en azote du sol est insuffisante. Dans ce cas, elle accepte le développement des bactéries sur ses racines et lui fournit l'énergie nécessaire à la fixation de l'azote atmosphérique, un processus très gourmand en énergie pour la plante. Ces organismes ne collaborent donc qu'en cas de contraintes extérieures.

Pour approfondir ces analogies et questionner la structure des entités économiques dans le système industriel, deux autres formes de symbioses sont intéressantes. L'ectosymbiose décrit une collaboration où le symbiote vit à la surface de son hôte, alors que l'endosymbiose s'applique au cas où le symbiote est situé dans l'espace intercellulaire ou intracellulaire de l'hôte. Les symbioses industrielles dont il est question dans cette recherche s'apparentent ainsi à de l'ectosymbiose. Cependant, la création de structures communes pour répondre à des contraintes extérieures, comme dans le cas des légumineuses

et des Rhizobiums, une endosymbiose, permettrait un gain d'efficacité supplémentaire. Ces solutions reviennent à dépasser les limites de l'entreprise telles que nous les connaissons aujourd'hui, avec des rôles des décideurs bien définis en fonction des formations des cadres dirigeants. Il s'agit de créer des systèmes entièrement intégrés en créant des entreprises mutualisées où des activités de différents secteurs sont réunies pour gagner en efficacité, à l'image du Guitang Group en Chine, dont l'organisation a été détaillée dans la Section 1.4.6.3. Cela revient finalement à briser le principal obstacle à la mise en œuvre des symbioses industrielles, à savoir la difficulté des entreprises à sortir de leur savoir-faire spécifique et de leurs objectifs de rentabilité à court terme pour s'intégrer dans leur environnement géographique et économique. En considérant plusieurs activités en une même structure juridique, les échanges se produisent alors à l'intérieur des limites légales et financières de l'entreprise et peuvent être considérés comme des synergies à part entière. Le concept des synergies intra-entreprise (Section 1.4.2), dans les entreprises de grande taille, existe depuis longtemps et est perçu comme un moyen de gagner en productivité. La synergie stratégique de complémentarité résulte du regroupement, de l'association ou de la mise en œuvre dans une seule entité de sous-ensembles complémentaires (Belotti 2005). Elle permet de créer des économies d'échelle à l'intérieur d'un groupe ou entre plusieurs entreprises. Ces endosymbioses industrielles peuvent alors constituer la base des zones industrielles du futur ou le partage des ressources endogènes, des infrastructures et des services. Modifier les limites juridiques de l'entreprise et l'échelle d'action des procédures d'optimisation faciliterait la mise en œuvre de synergies directement entre procédés industriels.

Deux constats peuvent être établis. Premièrement, les formations universitaires en économie, en sciences économiques et politiques, ou même en droit, n'intègrent que très rarement cette problématique. Il conviendrait de développer des formations situées à l'interface entre les sciences économiques et la gestion des ressources. Deuxièmement, les gains d'efficacité réalisés aujourd'hui grâce aux politiques publiques en faveur de la protection de l'environnement aboutissent le plus souvent à rendre les entreprises plus performantes et leur permettent de produire plus, parfois même en utilisant les principes du développement durable dans leur marketing pour justifier des activités finalement non soutenables. Un grand nombre d'entreprises utilisent le fait que l'environnement soit au centre des préoccupations sociétales pour devenir plus efficaces et accroître leur marge bénéficiaire en consommant proportionnellement moins de ressources. Mais l'accroissement de la production qui en résulte fait qu'en valeur absolue, la consommation globale de ressources non renouvelables continue d'augmenter.

Approfondir cette brève réflexion sur l'analogie entre biologie et économie pourrait mettre en lumière d'autres éléments intéressants. En particulier, l'étude du commensalisme, une interaction symbiotique où l'hôte fournit une partie de sa propre nourriture à l'autre organisme, appelé commensal, sans obtenir de contrepartie, pourrait fournir des arguments dans le cadre des symbioses industrielles.

Les réflexions précédentes ne remettent cependant pas en question la présence sur un territoire de certaines des activités fortement génératrices d'impacts et d'émissions. En Suisse, la capacité de certaines régions à réduire et peut-être supprimer leur dépendance aux combustibles fossiles en

appliquant les principes d'une société à 2000 watts semble prometteuse. Néanmoins, de nombreuses activités continueront à importer et à transformer de grandes quantités de matière dont l'extraction dans d'autres régions du monde n'est pas viable à long terme. Cette considération nous amène à considérer la globalisation de l'économie sous l'angle de la consommation des ressources naturelles. Elle permet d'importer sur un territoire une ressource qui n'y est naturellement pas présente. Elle entre alors en compétition avec certaines ressources endogènes parfois plus coûteuses à exploiter. En étant au fait des ressources disponibles sur un territoire, il est possible de se concentrer sur les activités qui permettent de les utiliser de manière durable et de favoriser les ressources et les produits locaux, lorsqu'ils sont disponibles. Les importations peuvent alors se limiter uniquement aux biens qui n'existent pas sur le territoire considéré.

Une approche plus régionale de la gestion des ressources constitue dès lors une solution en réduisant les impacts liés au transport international et en permettant à chaque région d'adapter progressivement son mode de vie pour un usage à long terme des ressources naturelles. Les activités les plus touchées seront bien évidemment celles qui dépendent de l'extraction, de la transformation et de la vente de ressources naturelles non renouvelables.

La même réflexion peut être faite en ce qui concerne les déchets. Chaque territoire devrait être responsable de ses propres déchets. La récupération et la réutilisation des déchets sont des activités à faible valeur ajoutée. En Suisse, l'économie sociale et solidaire peut aider à réutiliser ou à séparer et à valoriser les différentes fractions d'un produit qui n'est plus utilisable. Elle représente des activités que notre société industrialisée a négligées vu que le démontage et la récupération ne constituent pas des activités à forte valeur ajoutée. Imaginons que les décharges soient conçues et utilisées comme des mines et permettent de récupérer toutes les matières premières secondaires utiles aux activités économiques. Cette solution serait idéale, mais les coûts d'un tel système sont aujourd'hui beaucoup trop élevés et il reste plus intéressant d'extraire des ressources naturelles plutôt que de récupérer, recycler et retransformer les déchets. Techniquement, les contraintes sont également importantes. Les lois de la thermodynamique font qu'un grand nombre de matériaux se dégradent inexorablement au cours de leur utilisation ce qui rend leur réutilisation difficile. Cependant, la Suisse ferait bien de garder certains de ses déchets et de développer sur son propre territoire les infrastructures nécessaires à leur réutilisation, par exemple pour les familles de flux des plastiques ou des métaux.

Je suis bien conscient que les propositions discutées dans cette section risquent de provoquer une décroissance de certains secteurs de l'économie. Normalement, la décroissance sectorielle engendrée par la régionalisation de l'économie devrait être compensée par la nécessité de recréer de nombreuses autres activités sur le territoire considéré. Penser l'économie et la gestion des ressources à l'échelle locale, comme le proposent les symbioses industrielles, constituent alors une stratégie d'anticipation permettant d'accroître la résilience de l'économie d'un territoire. Cela signifie que le territoire concerné sera capable de s'adapter plus rapidement aux changements liés à la disponibilité des ressources et sera moins affecté par ceux-ci.

En conclusion, cette recherche propose des solutions pour mieux maîtriser et anticiper certains aspects de la transition industrielle et économique en cours. Elles permettent d'agir de manière proactive, plutôt que réactive lorsque la disponibilité de certaines ressources sera devenue réellement problématique. Ainsi, en plus des entreprises, il appartient également à l'Etat de se préparer afin de limiter l'impact des changements à venir sur la qualité de vie et le climat social de notre société et de faire en sorte que le développement éco-industriel ne soit pas simplement une manière de prolonger le fonctionnement actuellement non viable du système industriel.

5.5 TRANSPOSITION DES PROCEDURES ET OUTILS DEVELOPPES EN SUISSE DANS LE CONTEXTE ASIATIQUE

La région Asie-Pacifique, et en particulier la Chine, est aujourd'hui le centre de gravité de la production industrielle mondiale. De nombreuses activités économiques, essentiellement dans le secteur secondaire, y ont été déplacées ou créées au cours des dernières décennies, attirées par une législation environnementale moins contraignante qu'en Europe, une main-d'œuvre moins chère et surtout une forte croissance de la consommation locale. En raison de la croissance soutenue due à l'augmentation de la capacité d'exportation et de l'industrie ainsi qu'à l'émergence d'une classe moyenne dans certains pays, cette région doit relever des défis importants en terme de production et de consommation durable. Elle doit donc faire face à une pression accrue sur ses ressources naturelles et ses matières premières. Les combustibles et les carburants fossiles, les métaux et le phosphore semblent représenter les principaux enjeux (Liu, Chen et al. 2007; van Berkel 2007; Wang, Jiansu et al. 2008; Zhou, Hu et al. 2008; Fan, Hu et al. 2009).

Des projets de développement éco-industriel sont en cours en Asie depuis la fin des années nonantes. Au cours des dix dernières années, des projets ont été identifiés en Australie, en Chine, aux Philippines, en Indonésie, en Inde, en Malaisie, au Japon, en Corée, à Taiwan, au Vietnam, en Thaïlande, à Singapour et au Sri Lanka (Lowe 2001; Erkman et Ramaswamy 2003; Chiu et Yong 2004; Chiu, Ward et al. 2009).

Ces dernières années, la symbiose industrielle du Guitang Group, dans la région autonome chinoise de Guangxi Zhuang, en Chine, a fait l'objet de plusieurs publications académiques (Zhu et Côté 2004; Geng, Haight et al. 2007; Zhu, Lowe et al. 2007). Cette expérience est détaillée dans la Section 1.4.6.3. La zone de développement économique de Tianjin (TEDA), dans la baie de Bohai, au nord de la Chine, est également bien documentée pour sa transformation en parc éco-industriel (Geng 2005; Geng et Jun 2006; Geng, Zhu et al. 2007; Shi, Chertow et al. 2010). Le Guitang Group et TEDA sont des exemples de parcs éco-industriels incluant des symbioses industrielles qui existent actuellement en Chine. Yiping Fang, Raymond P. Côté et Rong Qin (2007) en ont identifié 13 autres au cours de l'année 2007. Le chiffre semble bien supérieur aujourd'hui, selon Yong Geng, Pan Zhuang, Raymond P. Côté et Tsuyoshi Fujita (2009), il en existerait plus de 100, dont 26 ont été sélectionnés comme projets pilotes par la State Environmental Protection Agency (SETA), mais les résultats réels de certains projets restent parfois difficiles à vérifier. C'est dans le but d'améliorer l'évaluation des projets en cours que la SETA a mis au point un standard pour l'évaluation des parcs éco-industriels (Geng, Zhang et al. 2009).

Au Japon, 26 projets d'*Eco-town* se sont développés depuis l'année 2000. Les objectifs de gestion des déchets proposés dans ce programme national incluent la mise en place de symbioses industrielles (Fujita 2006; van Berkel, Fujita et al. 2009; Geng, Tsuyoshi et al. 2010). Ce projet est détaillé dans la Section 1.4.6.4. D'autres pays d'Asie bénéficient aujourd'hui de l'expérience japonaise, comme la Corée qui a

développé un plan national pour le développement de parcs éco-industriels sur l'ensemble de son territoire (Kim 2002; Kang 2006; Park et Won 2007; Park, Rene et al. 2008), en particulier dans les villes de Ulsan, Banwol, Siwaha, Mipo, Onsan, Yeosu, Chungju, Jinhae, Haman, Jinju et Pohang (Section 1.4.6.5).

Les Philippines ont également fait plusieurs tentatives pour développer des parcs éco-industriels. Il s'agit même d'une des premières expériences dans le contexte asiatique (Lowe 2001). Ces projets ont été menés sous l'égide du PNUE, de l'Université de Yale et de l'US-EPA, en collaboration avec le Ministère philippin du commerce et de l'industrie (Chiu et Yong 2004). Le principal projet mené à la fin des années nonante était le projet PRIME. Une description plus détaillée est proposée en Annexe 4.

Plusieurs raisons ont mené à l'écriture de cette section, dédiée à l'Asie-Pacifique. Premièrement, je me suis rendu à plusieurs reprises dans cette région du monde au cours de mes années de recherches, principalement en Chine, aux Philippines, en Australie et en Corée. Tous ces séjours m'ont permis de m'initier aux enjeux liés à l'évolution du système industriel et économique dans cette région ainsi qu'aux développements de l'écologie industrielle. Ces éléments sont synthétisés dans une publication (Chiu, Ward et al. 2009) et des détails concernant ces déplacements sont présentés en Annexe 4. Deuxièmement, lors de nos recherches sur l'organisation des activités économique en Suisse et nos nombreux contacts avec les entreprises, nous nous sommes rendu compte que beaucoup d'entreprises internationales utilisent les expériences réalisées ici pour les appliquer sur leurs autres sites de production à travers le monde. La politique de coopération de la Suisse devrait donc s'orienter vers le transfert de connaissance du savoir-faire suisse dans le domaine de l'environnement et s'impliquer dans des projets de symbioses industrielles et de développement éco-industriel dans cette région. Si l'efficacité de l'industrie dans certains domaines s'améliore petit à petit, de nombreux projets n'aboutissent pas faute d'un financement approprié et d'une collaboration suffisante entre décideurs publics et privés.

En Asie-Pacifique, de nombreux acteurs du monde académique semblent conscients qu'un nouveau modèle de fonctionnement des activités économiques doit être créé, intégrant l'ensemble des décideurs dans un contexte de coopération. Au cours des dernières décennies, de nombreux outils d'aide à la décision ont été développés pour répondre aux problèmes du développement industriel non soutenable, cependant ceux-ci sont encore peu utilisés en Asie. Si l'éco-conception semble une préoccupation de nombreux acteurs industriels, le recours à des outils comme l'analyse de cycle de vie est encore peu répandu (Bai, Wieczorek et al. 2009).

Dans une région aussi vaste, il n'existe cependant à l'heure actuelle pas de modèle économique pour garantir une production respectueuse de l'environnement. L'Australie peut cependant servir de source d'inspiration en ce qui concerne certaines bonnes pratiques dans les domaines de la production propre et de l'éco-efficacité (van Berkel 2007), ainsi que le Japon pour son programme Eco-town (van Berkel, Fujita et al. 2009). L'éducation apparaît donc comme le premier enjeu majeur. Il est important d'informer, de sensibiliser et de former le plus grand nombre possible des décideurs de demain à ces enjeux, afin de voir émerger des solutions à l'échelle locale. Pour renseigner les consommateurs et les décideurs sur la

consommation et l'utilisation des ressources naturelles, il est ensuite nécessaire de connaître leur utilisation et leur cheminement. La multiplication des analyses de flux de matière et d'énergie garantit aujourd'hui l'accès à des informations de qualité.

En ce qui concerne le niveau de développement économique et industriel, l'historique du territoire tient une place importante. Or, ces pays n'ont pas, comme les pays européens, cent cinquante ans de Révolution industrielle derrière eux. La réalisation d'infrastructures d'approvisionnement et de collecte des effluents et des déchets est un processus long et coûteux. Selon la littérature disponible et les visites de terrain réalisées au cours de cette recherche, nous avons remarqué que le modèle des parcs éco-industriels et les expériences de mise en œuvre de symbioses industrielles se réduisent souvent à l'émergence de systèmes industriels moins performants que ceux existant actuellement en Europe, et principalement en Suisse, grâce à l'évolution progressive de la législation environnementale. Plutôt que de favoriser l'émergence d'un écosystème industriel performant, en couplant l'ensemble des outils d'optimisation disponibles, de nombreuses actions se révèlent être de simples solutions de traitement en fin de chaîne.

Pour répondre à ces enjeux, les pays comme la Chine, le Japon, la Corée, l'Inde ont néanmoins développé ces dernières années des programmes de production plus propre et d'écologie industrielle, principalement par l'intermédiaire de projets de création de parcs éco-industriel (Erkman et Ramaswamy 2003; Chiu et Yong 2004; Park, Rene et al. 2008; Chiu, Ward et al. 2009; Geng, Zhang et al. 2009; van Berkel, Fujita et al. 2009; Shi, Chertow et al. 2010). Certains de ces projets sont détaillés dans la Section 1.4.6 et dans l'Annexe 1.

L'importance des acteurs du territoire, privés et publics, pour favoriser l'émergence des symbioses industrielles a fait l'objet de nombreuses recherches ces dernières années (Baas et Boons 2004; Chiu et Yong 2004; Ashton 2008; Baas 2008; Boons et Howard-Grenville 2009; Brullot-Dermine 2009; Costa, Massard et al. 2010), mais peu d'information semblent disponibles dans le contexte asiatique (Chiu, Huang et al. 1999). Les procédures décrites dans cette thèse impliquent la participation des acteurs privés et publics aux processus de décision. Elles proposent un modèle d'action concerté et planifié, intégrant l'ensemble des parties. L'objectif de cette section est d'identifier les procédures et les outils qui pourraient être adaptés au contexte asiatique, ainsi que leurs modalités d'application.

5.5.1 Evaluation des possibilités d'application des procédures et outils dans le contexte Asie-Pacifique

La majorité des pays de cette région ont déjà initié des démarches de symbioses industrielles, de développement de parcs éco-industriels et de développement éco-industriel depuis la fin des années nonante, soit en même temps que certains pays européens ou que le canton de Genève, par exemple. Les barrières rencontrées sont cependant nombreuses et différentes de celles rencontrées en Suisse. Les mécanismes cognitif, culturel, structurel et politique sont très différents en Asie par rapport à l'Europe. Les

six mécanismes utilisés pour décrire le contexte social dans lequel se déroulent les projets de symbioses industriels (Section 2.2.1) s'appliquent également au contexte asiatique. Ils sont utilisés ci-dessous pour décrire le contexte dans lequel évoluent certains des projets visités dans la région Asie-Pacifique.

Les acteurs économiques semblent avoir de la peine à sortir de la logique du « business as usual » pour assurer la pérennité à long terme de leurs activités. Malgré l'importance des infrastructures construites ces dernières années, il semble que beaucoup de décisions sont prises pour maximiser le bénéfice à court terme. De nombreuses actions sont initiées par des institutions académiques et grâce à des financements nationaux et internationaux. Les activités de consulting, de la manière dont nous les connaissons en Europe, semblent peu répandues et le consulting international se limite encore aux grands projets pour des raisons de coûts. Les institutions académiques se positionnent dès lors comme les organismes qui disposent des connaissances nécessaires ainsi que de la confiance des gouvernements et des acteurs économiques. Leurs financements proviennent des gouvernements, de programmes de coopération internationaux et des organisations internationales. Ainsi, en référence au mécanisme cognitif qui permet de comprendre les décisions et les actions prises dans les limites de l'entreprise, il est possible de conclure que celles-ci ne sont pas suffisamment informées des risques que leurs activités représentent pour l'environnement et la santé humaine. Cette situation s'explique par le contexte culturel et économique qui ne considère pas les préoccupations environnementales comme un élément central du développement d'un territoire.

En se basant sur cette dernière considération, il est intéressant de caractériser les relations entre acteurs économiques en se référant aux mécanismes structurels, qui permettent de contextualiser les échanges économiques en fonction de l'état des relations entre individus ou organisations, et les mécanismes politiques, qui traitent de la manière dont les institutions économiques et les décisions sont modelées par les différents parties disposant d'un certain pouvoir de décision, en particulier les acteurs économiques et les pouvoirs publics. Outre l'extraction accélérée de ressources non renouvelables, la diffusion des substances polluantes semble être le principal problème dans les pays d'Asie visités. Les pays dits développés ont une responsabilité importante dans cette situation. Beaucoup de procédés obsolètes et très polluants ont été déplacés vers les pays asiatiques à cause des lois environnementales contraignantes, des coûts liés à la main-d'œuvre et afin de répondre à la demande locale. Les législations environnementales deviennent néanmoins de plus en plus contraignantes dans ces pays. Les Etats peinent cependant à contrôler leur application (Liu, Li et al. 2009). Mais plus l'Etat contrôle, plus il est perçu comme une contrainte et non comme un partenaire fiable avec qui collaborer. La perception des pouvoirs publics est donc négative en ce qui concerne l'application de la législation. A cela s'ajoute des problèmes de corruption sur certains territoires qui handicapent la mise en place d'une relation de confiance et accroît la culture du secret.

A la vue des éléments précédents, les procédures de terrain du Chapitre 2 et l'outil du Chapitre 3 semblent transposables dans le contexte asiatique sous réserve d'une adaptation au contexte. Elles s'approchent d'ailleurs des propositions faites par le Professeur Chiu dans le contexte asiatique à la fin

des années 1990 déjà (Chiu, Huang et al. 1999). Le premier obstacle dans les pays asiatiques réside dans le manque de confiance entre acteurs économiques ainsi que dans les rapports entre acteurs économiques et pouvoirs publics. Cette situation handicape les échanges d'informations et la mise à disposition de données fiables nécessaires pour détecter les potentiels d'optimisation de la gestion des ressources. Dans cette situation, il n'est pas nécessaire de recourir systématiquement à un outil informatique pour détecter les symbioses industrielles potentielles. En Suisse, l'accessibilité élevée aux données a permis de constituer des bases de données sectorielles qui, en ajout de la littérature internationale, peuvent aider à la modélisation des parcs éco-industriels et des symbioses industrielles. L'outil SymbioGIS a suscité beaucoup d'intérêt dans certains pays asiatiques lors de sa présentation à la dernière conférence de la société internationale d'écologie industrielle (ISIE) à Lisbonne (Massard, Viquerat et al. 2009; Grant, Seager et al. 2010). Il pourrait être utile pour mieux planifier un développement industriel harmonieux et efficace dans cette région en soutenant la planification territoriale et en introduisant le concept des symbioses industrielles directement dans les décisions stratégiques liées au développement et à l'organisation du territoire. Mais pour cela, le contexte de collaboration et de partage d'information doit continuer à se développer.

Le second obstacle réside dans le manque de contrôle dans l'application des lois environnementales qui empêche de limiter de manière efficace la diffusion de polluants dans l'environnement. Celles-là ne sont dès lors pas perçues comme suffisamment contraignantes par les entreprises. Dès lors, l'essor de symbioses industrielles peut aboutir à la mise en place de solutions non optimales mettant en danger les écosystèmes naturels et la santé humaine. Les bonnes pratiques mises en évidence en Suisse peuvent être communiquées aux acteurs économiques et institutionnels de ces territoires dans un but de sensibilisation et de transfert de connaissance. La Suisse peut apporter de nombreuses technologies permettant de limiter les processus de diffusion et une approche différentes des symbioses industrielles. Le Chapitre 4 a mis en évidence des symbioses industrielles existantes et potentielles dans le contexte suisse qui ne constituent pas une forme de sous-cyclage. Nous avons également détaillé le problème de l'incinération, qui constitue parfois un frein au recyclage en Suisse. Il serait judicieux pour les pays asiatique de mieux connaître le contexte suisse et l'historique de son développement industriel afin d'éviter certaines erreurs que nous avons commises au cours des dernières décennies et de s'orienter directement vers les solutions les plus efficaces en évitant le recours systématique à l'incinération à la place de la mise en décharge, et en évitant le sous-cyclage qui aboutit à la diffusion lente de substances polluantes dans l'environnement. Ainsi, la législation suisse appliquée aux symbioses industrielles peut servir d'exemple pour l'évaluation des solutions détectées dans ces pays.

Les procédures développées dans le contexte suisse peuvent apporter des solutions sous la forme d'outils participatifs pour aider à établir des liens de confiance entre acteurs et participer à l'essor d'écosystèmes industriels matures. Un coordinateur de projet, expert des symbioses industrielles et possédant une connaissance accrue du contexte national dans lequel il se trouve, peut créer un dynamisme d'équipe, animer des réseaux sociaux d'acteurs économiques et créer un contexte favorable

pour la mise en place de symbioses industrielles. Cette proposition est reprise dans les perspectives de recherche appliquée (Annexe 5) afin de proposer des partenariats avec des organismes des pays de la région Asie-Pacifique.

En conclusion, l'application du principe des symbioses industrielles à large échelle en Asie-Pacifique aurait un réel impact sur la consommation de ressources et les impacts sur l'environnement des activités économiques de par la présence d'un grand nombre de parcs industriels regroupant des activités du secteur secondaire. C'est dans cette région du monde que se situe le plus grand potentiel d'amélioration de la consommation des ressources. Le contexte culturel et politique est cependant différent que celui de la Suisse et pour favoriser l'essor des symbioses, le soutien des pouvoirs publics et des institutions internationale est nécessaire pour une application à large échelle.

5.5.2 Réflexion sur les possibilités de soutien et de collaboration pour accélérer l'essor des symbioses industrielles dans la région Asie-Pacifique

La détection et la mise en œuvre de symbioses industrielles sont des processus qui peuvent prendre plusieurs années et nous venons de conclure qu'ils ne sont pas toujours adaptés à la culture de la région Asie-Pacifique. Néanmoins, leur essor dans cette région du monde recèlent un potentiel très important pour favoriser une meilleure utilisation des ressources et réduire les impacts des activités économiques sur l'environnement et donc sur la santé humaine.

Pour accélérer le transfert de compétences et de savoirs depuis la Suisse, il est possible de s'appuyer sur différents organismes.

Premièrement, et nous l'avons déjà cité au début de cette section, les organes de coopération de la Suisse pourrait s'investir dans le transfert de connaissances en facilitant l'accès de ces pays aux méthodologie et aux outils de l'écologie industrielle. Dans le contexte de cette recherche, l'adaptation de SymbioGIS au contexte asiatique serait très pertinente. Le Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO) et la Direction du développement et de la Coopération (DDC) financent déjà des projets allant dans ce sens soit directement, soit par l'intermédiaire des Nations Unies comme l'Organisation des Nations Unies pour le développement industriel (ONUDI). La poursuite de ces collaborations et la prise en compte de domaines comme l'écologie industrielle et les symbioses industrielles va d'ailleurs dans le sens du masterplan cleantech proposé par le département de l'économie pour favoriser l'exportation du savoir suisse dans le domaine des technologies de l'environnement (OFFT 2010).

Deuxièmement, les Nations Unies financent plusieurs programmes d'aide au développement et de gestion de l'environnement. En particulier, l'ONUDI collabore avec le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) afin d'intégrer l'écologie industrielle dans son programme de production plus propre. L'ONUDI a, entre autres, les objectifs de fournir de services visant à améliorer l'utilisation rationnelle et durable de l'énergie dans l'industrie, d'aider les pays en développement à mettre en œuvre

les accords intergouvernementaux sur l'environnement et d'atteindre simultanément leurs objectifs économiques et environnementaux. Elle cherche à contribuer à la réduction de la pauvreté et au développement durable en modifiant radicalement la manière dont les sociétés produisent et consomment, elle soutient des modes durables de production et de consommation ⁶⁰. Pour contribuer à cet objectif, l'organisation soutient la création de :

3. Centres internationaux de technologie (ITS) dont l'objectif est de faciliter les transferts de technologies
4. Bureaux de promotion des investissements et de la technologie (ITPOs) qui fournissent une combinaison unique de services aux entrepreneurs et institutions pour former des alliances internationales dans l'investissement industriel et la commercialisation des technologies, vers ou en provenance des pays en développement et des économies en transition.
5. Centres nationaux et sub-nationaux pour la production plus propre (NCPCs et CPCs). Leur objectif est de favoriser une utilisation rationnelle des ressources et, dans la mesure du possible, accroître la productivité industrielle grâce à une production plus propre. Le programme fournit également une assistance technique et une aide dans l'élaboration de politiques visant à favoriser les investissements dans le transfert de technologies propres.

Les centres pour la production plus propre ont comme objectif d'identifier les acteurs du développement industriel et de leur proposer un programme de sensibilisation, de formations, ainsi que des audits de production plus propre (ce terme a été défini dans la Section 1.5.1.2). A l'échelle stratégique, ils peuvent servir d'intermédiaire dans la recherche de financement et conseiller les politiques publiques et les gouvernements locaux (UNEP et UNIDO 2004). Aux services de production plus propre, désignés par l'acronyme PP, viennent s'ajouter des services appelés PP+, en complément des outils PP pour la mise à niveau environnemental des entreprises. Les thématiques PP+ doivent permettre de parvenir à une application plus large des principes de la production propre. Dès lors, l'écologie industrielle et les symbioses industrielles constituent des domaines intéressants :

6. L'écologie industrielle en général apporte des méthodologies relatives à l'analyse de cycle de vie, pour évaluer la performance environnement d'activités ou de produits, et l'analyse de flux de matière et d'énergie ;
7. Les symbioses industrielles apportent spécifiquement des procédures pour travailler à l'échelle inter-entreprises afin de faciliter les échanges d'informations et à l'échelle du parc industriel pour détecter des potentiels de mutualisation et de partage d'infrastructure. Elles peuvent également participer à l'élaboration de guide pour initier un développement éco-industriel.

⁶⁰ <http://www.unido.org>, site consulté le 13 février 2011.

La problématique des parcs éco-industriels est d'ailleurs déjà soutenue depuis 2004 au moins par le Korean National Center for Cleaner Production (KNCPC). Le programme national coréen pour le développement de parcs éco-industriels a été détaillé dans la Section 1.4.6.5.

Troisièmement, il serait intéressant d'intégrer les symbioses industrielles dans les financements de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) et de la Banque Mondiale, en particulier dans les programmes liés à la promotion du bien-être économique et social et à la croissance verte. L'OCDE travaille depuis 2009 sur une stratégie pour promouvoir une croissance verte ⁶¹. A travers une gouvernance et des politiques publiques appropriées aux échelles nationales et internationales, elle cherche à promouvoir l'efficacité économique, l'intégrité environnementale et l'équité sociale. Son objectif est de poursuivre la croissance économique tout en préservant l'environnement, la biodiversité et les ressources (OCDE 2010).

⁶¹ <http://www.oecd.org/greengrowth>, site consulté le 16 février 2010.

5.6 CONCLUSION

Les symbioses industrielles sont un élément important du concept de l'écologie industrielle car elles permettent de décrire et d'améliorer l'organisation des flux de matière et d'énergie des activités économiques sur un territoire. En cinq ans de travail dans le contexte suisse romand, il a été possible de mettre en évidence de nombreuses opportunités de symbioses industrielles et de développer des procédures et des outils adaptés pour les mettre en application et les inclure dans les processus de décision. Si le concept semble aujourd'hui bien compris d'une partie des pouvoirs publics et des entreprises dans lesquels les études de cas ont été menées, il reste de nombreux obstacles à son utilisation à large échelle. En effet, leur mise en œuvre est complexe et fortement dépendante du contexte local. Comment faire dès lors pour convaincre une entreprise de modifier ses habitudes ? Comment s'assurer que la solution proposée est techniquement et environnementalement la plus efficace ?

A l'échelle du territoire, il reste donc beaucoup à faire : les besoins en outils techniques, en formation et en politiques publiques adaptées sont importants. Premier enjeu, les formations d'urbanisme, de génie civil et d'aménagement du territoire placent encore rarement la question des flux de matière et d'énergie au centre de leur enseignement. Le second enjeu pour l'écologie industrielle est d'encore mieux s'inscrire dans les politiques publiques afin de devenir un lien entre l'aménagement du territoire, l'économie et les préoccupations environnementales. De plus, au vu de la rapidité avec laquelle la technologie évolue, une adaptation constante des propositions de symbioses industrielles est nécessaire pour éviter qu'elles ne deviennent un frein à l'évolution technologique (principalement à l'échelle du procédé) destinée à réduire les impacts sur l'environnement.

Les conclusions de ce travail montrent que l'écologie industrielle et les symbioses industrielles à un développement industriel respectueux de l'environnement à l'échelle internationale, en Suisse comme en Asie. Les éléments discutés prouvent qu'il s'agit d'une orientation utile et efficace pour accompagner la transition du système industrielle. Cependant, le chemin est encore long et de nombreuses questions restent ouvertes à la fin de cette première thèse de doctorat réalisée sur les symbioses industrielles dans le contexte suisse romande. J'espère que ce travail ouvrira la voie à d'autres recherches qui permettront de faire avancer ce domaine de recherche appliquée, afin qu'il devienne un élément central du développement harmonieux de notre cadre de vie.

Bibliographie

A260 (2001). Loi sur l'action publique en vue d'un développement durable. G. Conseil. Genève, République et canton de Genève. **A 2 60**: 4.

Adamides, E. D. and Mouzakis, Y. (2009). "Industrial ecosystems as technological niches." Journal of Cleaner Production **17**(2): 172-180.

ADEME (2001). Etude de valorisation des cendres de chaufferies bois. ADEME. Paris, ADEME - DVNAC: 92.

Adoue, C. (2004). Méthodologie d'identification de synergies éco-industrielles réalisables entre entreprises sur le territoire français. Troyes, Université de technologie de Troyes: 224.

Adoue, C. (2005). Recherche de synergies éco-industrielle sur le territoire du canton de Genève. Systèmes Durables. Genève, Groupe de travail Ecosite - République et canton de Genève: 57.

Adoue, C. (2007). Mettre en oeuvre l'écologie industrielle. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

Al-Omari, S. B. (2008). "Used engine lubrication oil as a renewable supplementary fuel for furnaces." Energy Conversion and Management **49**(12): 3648-3653.

Allenby, B. (1999). Industrial Ecology, Policy Framework and Implementation. Upper Saddle River, Prentice Hall, NJ.

Allenby, B. R. and Cooper, W. E. (1994). "Understanding industrial ecology from a biological systems perspective." Environmental Quality Management **3**(3): 343-354.

Amari, T., Themelis, N. J. and Wernick, I. K. (1999). "Resource recovery from used rubber tires." Resources Policy **25**(3): 179-188.

Andrews, C. J. (2002). Industrial ecology and spatial planning. A Handbook of Industrial Ecology. R. U. Ayres and L. W. Ayres. Cheltenham, Edward Elgar Publishing: 476 - 487.

Antille, B. (2007). Détection de synergies éco-industrielles sur le territoire de Lausanne Région. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 82.

Ashton, W. (2008). "Understanding the Organization of Industrial Ecosystems." Journal of Industrial Ecology **12**(1): 34-51.

Assefa, G., Björklund, A., Eriksson, O., et al. (2005). "ORWARE: an aid to environmental technology chain assessment." Journal of Cleaner Production **13**(3): 265-274.

Ayres, R. U. (2004). "On the life cycle metaphor: where ecology and economics diverge." Ecological Economics **48**(4): 425-438.

Ayres, R. U. and Ayres, L. W. (2002). A Handbook of Industrial Ecology. Cheltenham, Edward Elgar Publishing.

Baas, L. (1998). "Cleaner production and industrial ecosystems, a Dutch experience." Journal of Cleaner Production **6**(3-4): 189-197.

Baas, L. (2008). "Industrial symbiosis in the Rotterdam Harbour and Industry Complex: reflections on the interconnection of the techno-sphere with the social system." Business strategy and the environment **17**(5): 330-340.

Baas, L. W. (2000). "Developing an Industrial Ecosystem in Rotterdam: Learning by WhatQuest." Journal of Industrial Ecology **4**(2): 4-6.

Baas, L. W. and Boons, F. A. (2004). "An industrial ecology project in practice: exploring the boundaries of decision-making levels in regional industrial systems." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1073-1085.

Baas, L. W. and Huisingh, D. (2009). "The synergistic role of embeddedness and capabilities in industrial symbiosis: illustration based upon 12 years of experiences in the Rotterdam Harbour and Industry Complex." Progress in Industrial Ecology, An International Journal **5**: 399-421.

Baccini, P. (1996). "Understanding regional metabolism for a sustainable development of urban systems." Environmental Science and Pollution Research **3**(2): 108-111.

Baccini, P. and Brunner, P. H. (1991). Metabolism of the Anthroposphere. Springer-Verlag. New-York, Berlin.

Bai, X., Wieczorek, A. J., Kaneko, S., et al. (2009). "Enabling sustainability transitions in Asia: the importance of vertical and horizontal linkages." Technological Forecasting and Social Change **76**(2): 255 - 266.

Barles, S. (2004). Mesurer la performance écologique des villes et des territoires: le métabolisme de Paris et de l'île-de-France. Paris, Laboratoire théorie des mutations urbaines, CNRS et Université de Paris 8: 98.

Barthelemy, L. (2008). Analyse des flux de matière et d'énergie de la région lausannoise dans le cadre d'une démarche d'écologie industrielle. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 45.

Belotti, J. (2005). La synergie dans l'entreprise. Paris, Lavoisier.

Bengoa, X. (2007). Synergies industrielles à Genève: recherche de nouvelles opportunités et analyse de l'efficacité du système de recyclage. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 187.

Berliant, M. and ten Raa, T. (1994). "Regional science: The state of the art." Regional Science and Urban Economics **24**(5): 631-647.

Billen, G., Toussaint, F., Peeters, P., et al. (1983). L'écosystème Belgique. Essai d'écologie industrielle. Bruxelles, Centre de recherche et d'information sociopolitiques.

- Binder, C. R., de Baan, L. and Wittmer, D. (2009). Phosphorflüsse in der Schweiz. Stand, Risiken und Handlungsoptionen. Umwelt-Wissen Nr. 0928. Bern, Bundesamt für Umwelt: 161.
- BIRD (2007). Etude sur la valorisation des restes de peinture – Etude de faisabilité technique et économique, Etat de Vaud – DES, Service des eaux, sols et assainissement: 53.
- Bixio, D., Thoeve, C., De Koning, J., et al. (2006). "Wastewater reuse in Europe." Desalination **187**(1-3): 89-101.
- Blunier, P. (2009). Méthodologie de gestion durable des ressources du sous-sol urbain. Faculté de l'environnement naturel, architectural et construit. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Thèse de doctorat: 262**.
- Boiral, O. and Kabongo, J. (2004). Ecologie industrielle et apprentissage organisationnel: des concepts à la pratique. 13ème Conférence de l'Association Internationale de Management Stratégique. Vallée de Seine, Normandie, France, Association Internationale de Management Stratégique: 26.
- Boons, F. A. and Howard-Grenville, J. A. (2009). The Social Embeddedness of Industrial Ecology. Cheltenham, Edward Elgar Publishing Ltd.
- Boons, F. A. A. and Baas, L. W. (1997). "Types of industrial ecology: The problem of coordination." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 79-86.
- Bossilkov, A., van Berkel, R. and Corder, G. D. (2005). Regional Synergies for Sustainable Resource Processing: a Status Report. Perth, Centre for Sustainable Resource Processing, Curtin University of Technology: 116.
- Bourg, D. and Erkman, S. (2003). Perspectives on Industrial Ecology, Greenleaf Publishing Limited.
- BP (2010). BP Statistical Review of World Energy, British Petroleum: 45.
- Bringezu, S. (2009). Sustainable Resource Management: Global Trends, Visions and Policies. Sheffield, UK, Greenleaf Publishing.
- Bringezu, S., Schütz, H., Steger, S., et al. (2004). "International comparison of resource use and its relation to economic growth: The development of total material requirement, direct material inputs and hidden flows and the structure of TMR." Ecological Economics **51**(1-2): 97-124.
- Bronstein, J. L. (2009). Mutualism and Symbiosis. The Princeton Guide to Ecology. S. A. Levin. Princeton, Princeton University Press: 233 - 238.
- Brown, J., Gross, D. and Wiggs, D. (1997). "The MatchMaker! System: Creating Virtual Eco-Industrial Parks." Yale F&ES Bulletin.
- Brulot-Dermine, S. (2006). L'écologie industrielle: mise en oeuvre à l'échelle d'un territoire. Scientific Workshop: Frontiers of Reserach in Industrial Ecology, University of Lausanne, Switzerland.
- Brulot-Dermine, S. (2009). Mise en oeuvre de projets territoriaux d'écologie industrielle en France: vers un outil méthodologique d'aide à la décision. Troyes, Université de technologie de Troyes. **Thèse de doctorat: 427**.

- Brulot-Dermine, S. (2009). The role of ICT in industrial ecology projects - the French perspective. 23rd International Conference on Environmental Informatics - Informatics for environmental protection, sustainable development and risk management. University of Applied Science, HTW Berlin, Germany. **2**: 261 - 267.
- Brunner, P. H. and Rechberger, H. (2004). Practical Handbook for Material Flow Analysis. Boca Raton, CRC Press LLC.
- Burrough, P. A. and McDonnell, R. A. (1998). Principles of Geographical Information Systems, Oxford University Press.
- Burström, F. and Korhonen, J. (2001). "Municipalities and industrial ecology: reconsidering municipal environmental management." Sustainable Development **9**(1): 36-46.
- Capello, C., Hellweg, S., Badertscher, B., et al. (2007). "Environmental Assessment of Waste-Solvent Treatment Options." Journal of Industrial Ecology **11**(4): 26-38.
- Carles, L. (2009). Analyse des potentialités d'un outil SIG pour la détection de symbioses industrielles. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Travail de semestre**: 22.
- Carvalho, A. R., Harbi, S., Verrey, C., et al. (2006). Recherche de synergies éco-industrielles sur le territoire du canton de Genève - Aspects légaux et environnementaux. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne: 40.
- Carvalho, A. R. and Massard, G. (2010). Analyse du potentiel de substitution de l'eau potable pour les activités économiques du canton de Genève. Genève, Groupe de travail Ecosite, Direction générale de l'environnement et Direction générale de l'eau: 32.
- Casavant, T. E. and Côté, R. P. (2004). "Using chemical process simulation to design industrial ecosystems." Journal of Cleaner Production **12**: 901 - 908.
- CEE (1993). Annexe au Règlement n° 696/93 du Conseil du 15 mars 1993 relatif aux unités statistiques d'observation et d'analyse du système productif dans la Communauté. CEE. n° **696/93**.
- CFCS (1999). Constitution fédérale de la Confédération suisse. 101. C. suisse. Berne, Confédération suisse. **101**: 90.
- Charrière, B., Niwa, N., Massard, G., et al. (2008). Policy Implications of MFA: Case Study of Geneva, Switzerland. ConAccount 2008, Prague.
- Chertow, M. (2000). "Industrial Symbiosis: Literature and Taxonomy." Annual Review of Energy and the Environment **25**: 313 - 337.
- Chertow, M. (2009). Dynamics of geographically based industrial ecosystems. The Dynamics of Regions and Networks in Industrial Ecosystems. M. Ruth and B. Davidsdottir. Cheltenham, Edward Elgar: 6-27.

- Chertow, M. and Ashton, W. (2009). The social embeddedness of industrial symbiosis linkages in Puerto Rican industrial regions. The social embeddedness of industrial ecology. F. A. Boons and J. A. Howard-Grenville. Cheltenham, Edward Elgar: 128 - 151.
- Chertow, M. R. (2007). "Uncovering" Industrial Symbiosis." Journal of Industrial Ecology **11**(1): 11-30.
- Chertow, M. R. and Lombardi, D. R. (2005). "Quantifying Economic and Environmental Benefit of Co-located Firms." Environmental Science & Technology **vol. 39**(no. 17): 6535 - 6541.
- Cherubini, F., Bargigli, S. and Ulgiati, S. (2009). "Life cycle assessment (LCA) of waste management strategies: Landfilling, sorting plant and incineration." Energy **34**(12): 2116-2123.
- Chiu, A. S. F., Ward, J. V. and Massard, G. (2009). "Introduction to the special issue on Advances in Life-Cycle Approaches to Business and Resource Management in the Asia-Pacific Region." Journal of Cleaner Production **17**(14): 1237-1240.
- Chiu, A. S. F. and Yong, G. (2004). "On the industrial ecology potential in Asian Developing Countries." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1037-1045.
- Chiu, S.-y., Huang, J. H., Lin, C.-S., et al. (1999). "Applications of a corporate synergy system to promote cleaner production in small and medium enterprises." Journal of Cleaner Production **7**(5): 351-358.
- Clayton, A., Muirhead, J. and Reichgelt, H. (2003). "Enabling Industrial Symbiosis through a Web-Based Waste Exchange." Greener Management International(40): 93 - 106.
- Cohen-Rosenthal, E. (2003). Eco-industrial Strategies: Unleashing synergy between economic development and the environment. Sheffield, UK, Greenleaf Publishing.
- Cohen-Rosenthal, E. (2004). "Making sense out of industrial ecology: a framework for analysis and action." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1111-1123.
- Contex (1997). Arrêt Contex. Tribunal administratif du canton de Berne. Berne, Traduction dans le Journal du tribunal 1998 I 490. **ATF 123 II 359**.
- Cordell, D., Drangert, J.-O. and White, S. (2009). "The story of phosphorus: Global food security and food for thought." Global Environmental Change **19**(2): 292-305.
- Costa, I. and Ferrão, P. (2010). "A case study of industrial symbiosis development using a middle-out approach." Journal of Cleaner Production **18**(10-11): 984-992.
- Costa, I., Massard, G. and Agarwal, A. (2010). "Waste management policies for industrial symbiosis development: case studies in European countries." Journal of Cleaner Production **18**(8): 815-822.
- Côté, R. P., Booth, A. and Louis, B. (2006). "Eco-efficiency and SMEs in Nova Scotia, Canada." Journal of Cleaner Production **14**(6-7): 542-550.
- Côté, R. P. and Cohen-Rosenthal, E. (1998). "Designing eco-industrial parks: a synthesis of some experiences." Journal of Cleaner Production **6**(3-4): 181-188.
- Côté, R. P. and Hall, J. (1995). "Industrial parks as ecosystems." Journal of Cleaner Production **3**(1-2): 41-46.

- Côté, R. P., Lopez, J., Marche, S., et al. (2008). "Influences, practices and opportunities for environmental supply chain management in Nova Scotia SMEs." Journal of Cleaner Production **16**(15): 1561-1570.
- CTEC-Varenes (2003). L'analyse Pinch pour l'utilisation efficace de l'énergie, de l'eau et de l'hydrogène. Varenes, Canada, Centre de technologie de l'énergie de CANMET: 71.
- Davis, C., Nikolic, I. and Dijkema, G. P. (2010). "Industrial Ecology 2.0." Journal of Industrial Ecology **14**(5): 707-726.
- de Faria, D. C., Ulson de Souza, A. A. and Guelli Ulson de Souza, S. M. d. A. (2009). "Optimization of water networks in industrial processes." Journal of Cleaner Production **17**(9): 857-862.
- de Montmollin, A., Altwegg, D., Meier, A., et al. (2003). Le développement durable en Suisse, Indicateurs et commentaires. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique: 94.
- de Montmollin, A., Altwegg, D., Roth, I., et al. (2003). Monitoring du développement durable, MONET, Rapport final - Méthodes et résultats. 21 - Développement durable et disparités régionales. OFS. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique: 47.
- de Souza, G. R., dos Santos, A. M., Ferreira, S. L., et al. (2009). "Evaluation of the performance of biodiesel from waste vegetable oil in a flame tube furnace." Applied Thermal Engineering **29**(11-12): 2562-2566.
- DEFRA (2007). Waste Strategy for England 2007. Norwich, The Stationery Office: 123.
- Demirbas, A. (2009). "Biodiesel from waste cooking oil via base-catalytic and supercritical methanol transesterification." Energy Conversion and Management **50**(4): 923-927.
- Desrochers, P. (2002). "Cities and Industrial Symbiosis: Some Historical Perspectives and Policy Implications." Journal of Industrial Ecology **5**(4): 29-44.
- Desrochers, P. (2002). "Industrial ecology and the rediscovery of inter-firm recycling linkages: historical evidence and policy implications." Industrial and Corporate Change **11**: 1031-1057.
- Desrochers, P. (2004). "Industrial symbiosis: the case for market coordination." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1099-1110.
- Deutz, P. and Gibbs, D. (2004). "Eco-industrial development and economic development: industrial ecology or place promotion?" Business strategy and the environment **13**(5): 347-362.
- Dewett, T. and Jones, G. R. (2001). "The role of information technology in the organization: a review, model, and assessment." Journal of Management **27**(3): 313-346.
- Dragicevic, S. (2004). "The potential of Web-based GIS." Journal of Geographical Systems **6**(2): 79-81.
- Duchin, F., Levine, S. H., Sven Erik, J., et al. (2008). Industrial Ecology. Encyclopedia of Ecology. Oxford, Academic Press: 1968-1975.
- Duret, B. (2007). Premiers retours d'expériences en écologie industrielle: études de cas en Europe et en Amérique du Nord. Les cahiers de la Chaire d'Ecologie Industrielle N°1. Troyes, Université de technologie de Troyes: 60.

- Ehrenfeld, J. (2001). "Environmental Management Systems A Partner for Industrial Ecology?" Journal of Industrial Ecology **5**(1): 1-3.
- Ehrenfeld, J. and Gertler, N. (1997). "Industrial Ecology in Practice: The Evolution of Interdependence at Kalundborg." Journal of Industrial Ecology **1**(1): 67-79.
- Ehrenfeld, J. R. (1997). "Industrial ecology: A framework for product and process design." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 87-95.
- Elabras Veiga, L. B. and Magrini, A. (2009). "Eco-industrial park development in Rio de Janeiro, Brazil: a tool for sustainable development." Journal of Cleaner Production **17**(7): 653-661.
- Elinwa, A. U. and Mahmood, Y. A. (2002). "Ash from timber waste as cement replacement material." Cement and Concrete Composites **24**(2): 219-222.
- Eriksson, O., Frostell, B., Björklund, A., et al. (2002). "ORWARE - a simulation tool for waste management." Resources, Conservation and Recycling **36**(4): 287-307.
- Erkman, S. (1997). "Industrial ecology: An historical view." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 1-10.
- Erkman, S. (1998). Vers une écologie industrielle. Paris, Charles Léopold Mayer.
- Erkman, S. (2005). Ecologie industrielle à Genève: Premiers résultats et perspectives. Groupe de travail Ecosite. Genève, Département du territoire: 47.
- Erkman, S. and Ramaswamy, R. (2003). Applied Industrial Ecology - A New Platform for Planning Sustainable Societies - Focus on Developing Countries with Case Studies from India. Bangalore, Aicra Publishers.
- Esty, D. C., Levy, M. A., Kim, C. H., et al. (2008). Environmental Performance Index 2008 New Haven, Yale Center for Environmental Law and Policy: 28.
- Faist, M., Frischknecht, R., Cornaglia, L., et al. (2003). Métabolisme des activités économiques du canton de Genève - Phase 1. Genève, Groupe de travail Ecosite, République et canton de Genève: 47.
- Fan, Y., Hu, S., Chen, D., et al. (2009). "The evolution of phosphorus metabolism model in China." Journal of Cleaner Production **17**(9): 811-820.
- Fang, Y., Côté, R. P. and Qin, R. (2007). "Industrial sustainability in China: Practice and prospects for eco-industrial development." Journal of Environmental Management **83**(3): 315-328.
- Fernández, I. and Ruiz, M. C. (2009). "Descriptive model and evaluation system to locate sustainable industrial areas." Journal of Cleaner Production **17**(1): 87-100.
- Fiksel, J. (2003). "Designing Resilient, Sustainable Systems." Environmental Science & Technology **37**(23): 5330-5339.
- Florida, R. (1995). "Toward the learning region." Futures **27**(5): 527-536.
- Fonjallaz, D. and Suquet, S. (2007). Valorisation de données de type flux de matière d'un parc industriel des Philippines par le logiciel d'étude de synergie PRESTEO. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. **Travail de semestre**: 19.

- Francis, C. G. (2003). The chemical industry from an industrial ecology perspective. Perspectives on Industrial Ecology. D. Bourg and S. Erkman. Sheffield, UK, Greenleaf Publishing Limited: 120-134.
- Frosch, R. A. and Gallopoulos, N. (1989). "Strategies for manufacturing." Scientific American **261**(3): 144 - 152.
- Fujita, T. (2006). Planning Tools for industrial symbiosis GIS based; evaluation for Kawasaki Eco-Town Japan. Conference proceedings from the International Conference on Construction & Development of Eco-Industrial Parks, Tianjin, China.
- Geng, Y. (2005). "The Role of Pricing on Integrated Water Management at the Industrial Park Level: A Case of TEDA." Water and Environment Journal **19**(3): 256-263.
- Geng, Y., Haight, M. and Zhu, Q. (2007). "Empirical analysis of eco-industrial development in China." Sustainable Development **15**(2): 121-133.
- Geng, Y. and Jun, Y. (2006). "Intergrated Water Resource Management at the Industrial Park Level: a case of TEDA." International Journal of Sustainable Development an World Ecology **volume 13**(Issue 1): p. 37 – 50.
- Geng, Y., Tsuyoshi, F. and Chen, X. (2010). "Evaluation of innovative municipal solid waste management through urban symbiosis: a case study of Kawasaki." Journal of Cleaner Production **18**(10-11): 993-1000.
- Geng, Y., Zhang, P., Côté, R. P., et al. (2009). "Assessment of the National Eco-Industrial Park Standard for Promoting Industrial Symbiosis in China." Journal of Industrial Ecology **13**(1): 15-26.
- Geng, Y., Zhu, Q. and Haight, M. (2007). "Planning for Integrated Solid Waste Management at the Industrial Park Level: A Case of Tianjin, China." Waste Management **27**(1): 141-150.
- Gerber, L. (2007). Integrated Kitchen Waste Management in the Philippines' Economic Zones. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Rapport de stage: 47.**
- GESDEC (2009). EcomatGE. Etat de Genève, GESDEC: 16.
- GESDEC (2009). Guide technique des applications recommandées dans le cadre du projet Ecomat. Etat de Genève, GESDEC: 56.
- GESDEC (2009). Plan de gestion des déchets du canton de Genève 2009-2012. Genève, Etat de Genève: 56.
- Gibbs, D. and Deutz, P. (2005). "Implementing industrial ecology? Planning for eco-industrial parks in the USA." Geoforum **36**: 452-464.
- Girardin, L., Marechal, F., Dubuis, M., et al. (2010). "EnerGis: A geographical information based system for the evaluation of integrated energy conversion systems in urban areas." Energy **35**(2): 830-840.
- Goodchild, M. F. (1992). "Geographical information science." International Journal of Geographical Information Science **6**(1): 31 - 45.

- Graedel, T. E. and Howard-Grenville, J. A. (2005). Greening the Industrial Facility - Perspectives, Approches and Tools. New York, Springer.
- Grant, G. B., Seager, T. P., Massard, G., et al. (2010). "Information and Communication Technology for Industrial Symbiosis." Journal of Industrial Ecology **14**(5): 740-753.
- Grebler, O. (2007). Evaluation du potentiel d'implantation d'une activité de régénération de solvants. technologies disponibles et débouchés pour l'industrie genevoise. Lausanne, Université de Lausanne. **Travail de semestre: 50.**
- Griffith, R., Redding, S. and Simpson, H. (2009). "Technological Catch-up and Geographic Proximity." Journal of Regional Science **49**(4): 689-720.
- Hagman, M., Nielsen, J. L., Nielsen, P. H., et al. (2008). "Mixed carbon sources for nitrate reduction in activated sludge-identification of bacteria and process activity studies." Water Research **42**(6-7): 1539-1546.
- Halada, K. (2008). Extracted metal resources, Personal communication.
- Hanser, C. (1983). "Regional policy in Switzerland: an analysis of its effectiveness and an outline of a strategic reorientation." Geoforum **14**(4): 363-373.
- Hanser, C., Kuster, J., Gessler, R., et al. (2006). Utilisation des matières premières et élimination des déchets dans une optique durable. Bases pour l'élaboration de la future politique fédérale de l'environnement. Connaissance de l'environnement. Berne, Office fédéral de l'environnement, Confédération helvétique. n° **0612**: 94.
- Hardi, P. and Zdan, T. (1997). Assessing Sustainable Development: Principles in Practice. Winnipeg, Canada, International Institute for Sustainable Development: 167.
- Heeres, R. R., Vermeulen, W. J. V. and de Walle, F. B. (2004). "Eco-industrial park initiatives in the USA and Netherlands: first lessons." Journal of Cleaner Production **12**: 985 - 995.
- Hernández, F., Urkiaga, A., De las Fuentes, L., et al. (2006). "Feasibility studies for water reuse projects: an economical approach." Desalination **187**(1-3): 253-261.
- Hertwich, E. G. (2005). "Consumption and the Rebound Effect: An Industrial Ecology Perspective." Journal of Industrial Ecology **9**(1-2): 85-98.
- Hewes, A. K. (2005). The role of champions in establishing eco-industrial parks. Departement of Environmental Studies. New York, Antioch New England Graduate School. **Thèse de doctorat**: 291.
- Huber, G. P. (1990). "A Theory of the Effects of Advanced Information Technologies on Organizational Design, Intelligence, and Decision Making." The Academy of Management Review **15**(1): 47 - 71.
- Hügi, M., Gerber, P., Hauser, A., et al. (2008). Rapport sur la gestion des déchets 2008. Politique suisse de gestion des déchets 2005 - 2007: données et perspectives. Etat de l'environnement. Berne, Office fédéral de l'environnement. **Etat de l'environnement n°0830**: 122.

- Huxhold, W. E. (1991). An Introduction to Urban Geographic Information Systems, Oxford University Press.
- IE (1998). Applying Decision Support Tools For Eco-Industrial Park Planning: A Case Study in Burlington, Vermont. Industrial Economics Inc. Cambridge, MA, Industrial Economics Inc. for the US Environmental Protection Agency: 16.
- Ingensand, J., Golay, F., Caloz, R., et al. (2008). "Evaluating the usability of a Web-GIS for wine-cultivation." Cybergeo, European Journal of Geography.
- ISO14040 (2006). ISO 14040: Environmental management . Life cycle assessment - Principles and framework. 14040. ISO, ISO. **14040:2006(E)**: 28.
- Isserman, A. (2001). Regional Science. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. J. S. Neil and B. B. Paul. Oxford, Pergamon: 12930-12935.
- Jacobsen, N. B. (2006). "Industrial Symbiosis in Kalundborg, Denmark: A Quantitative Assessment of Economic and Environmental Aspects." Journal of Industrial Ecology **10**(1 - 2): 239 - 255.
- Jacobsen, N. B. and Anderberg, S. (2004). Understanding the evolution of industrial symbiotic networks: the case of Kalundborg. Economics of Industrial Ecology. J. van den Bergh. Cambridge, MIT Press: 313 - 336.
- Jobin, R. (2008). Etude de l'applicabilité des métriques écosystémiques pour l'analyse et la compréhension du système industriel. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 75.
- Johansson, A., Kisch, P. and Mirata, M. (2005). "Distributed economies - A new engine for innovation." Journal of Cleaner Production **13**(10): 971 - 979.
- Jolliet, O., Margni, M., Charles, R., et al. (2003). "IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology." The International Journal of Life Cycle Assessment **8**(6): 324-330.
- Jolliet, O., Saadé, M. and Crettaz, P. (2005). Analyse du cycle de vie: Comprendre et réaliser un écobilan. Lausanne, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes: 242.
- Jungbluth, N. (2006). Ecobilan, eau potable - eau minérale. ESU - Services. Uster, Société Suisse de l'Industrie du Gaz et des Eaux: 7.
- Kang, H. J. (2006). Direction for Korean Industrial Environment and the Status of Eco-Industrial Development Program. Proceedings from the 4th International Conference on Eco-Industrial Parks, Seoul, Korea, KNCPC.
- Kanokkantarapong, V., Kiatkittipong, W., Panyapinyopol, B., et al. (2009). "Used lubricating oil management options based on life cycle thinking." Resources, Conservation and Recycling **53**(5): 294-299.
- Karlsson, M. and Wolf, A. (2008). "Using an optimization model to evaluate the economic benefits of industrial symbiosis in the forest industry." Journal of Cleaner Production **16**(14): 1536-1544.

- Karlsson, R. and Luttrupp, C. (2006). "EcoDesign: what's happening? An overview of the subject area of EcoDesign and of the papers in this special issue." Journal of Cleaner Production **14**(15-16): 1291-1298.
- Keckler, S. E. and Allen, D. T. (1998). "Material Reuse Modeling." Journal of Industrial Ecology **2**(4): 79-92.
- Keel, A. (2007). "Que faire des cendres?" Energie-bois Suisse **18**: 4.
- Kijak, R. and Moy, D. (2004). "A Decision Support Framework for Sustainable Waste Management." Journal of Industrial Ecology **8**(3): 33 - 50.
- Kim, J., Kim, J., Kim, J., et al. (2009). "A simultaneous optimization approach for the design of wastewater and heat exchange networks based on cost estimation." Journal of Cleaner Production **17**(2): 162-171.
- Kim, S. (2002). "Korean waste management and eco-efficient symbiosis – a case study of Kwangmyong City." Clean Technologies and Environmental Policy **3**(4): 371-382.
- Kincaid, J. and Overcash, M. (2001). "Industrial Ecosystem Development at the Metropolitan Level." Journal of Industrial Ecology **5**(1): 117-126.
- KNPCPC (2005). Establishment of Eco-Industrial Parks for Infrastructure of Cleaner Production in Korea. KNPCPC. Séoul.
- Koch, G. and Siegrist, H. (1997). "Denitrification with methanol in tertiary filtration." Water Research **31**(12): 3029-3038.
- Kollbrunner, S. (2008). Le développement durable en bref - 2008 - 17 indicateurs-clés pour mesurer les progrès. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique: 24.
- Korhonen, J. (2001). "Co-production of heat and power: an anchor tenant of a regional industrial ecosystem." Journal of Cleaner Production **9**: 509 - 517.
- Korhonen, J. (2001). "Regional industrial ecology: examples from regional economic systems of forest industry and energy supply in Finland." Journal of Environmental Management **63**(4): 367-375.
- Korhonen, J. (2002). "A material and energy flow model for co-production of heat and power." Journal of Cleaner Production **10**(6): 537-544.
- Korhonen, J., Niemeläinen, H. and Pulliainen, K. (2002). "Regional industrial recycling network in energy supply - the case of Joensuu City, Finland." Corporate Social Responsibility and Environmental Management **9**(170 - 185).
- Korhonen, J., Okkonen, L. and Niutanen, V. (2004). "Industrial ecosystem indicators—direct and indirect effects of integrated waste- and by-product management and energy production." Clean Technologies and Environmental Policy **6**(3): 162-173.
- Korhonen, J., Wihersaari, M. and Savolainen, I. (2001). "Industrial ecosystem in the Finnish forest industry: using the material and energy flow model of a forest ecosystem in a forest industry system." Ecological Economics **39**(1): 145-161.

- Krafft, U. (2008). Politique de la ressource bois. Stratégie, objectifs et plan d'action bois. Berne, Office fédéral de l'environnement, Confédération helvétique: 33.
- Kurup, B., Altham, W. and van Berkel, R. (2005). Triple bottom line accounting applied for industrial symbiosis. 4th ALCAS Conference, Sydney.
- Lambert, A. J. D. (2001). Life-Cycle Chain Analysis, Including Recycling. Greener Manufacturing and Operations. J. Sarkis. Sheffield, UK, Greenleaf.
- Lambert, A. J. D. and Boons, F. A. (2002). "Eco-industrial parks: stimulating sustainable development in mixed industrial parks." Technovation **22**(8): 471-484.
- LAT (1979). Loi fédérale sur l'aménagement du territoire. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **700**: 16.
- LChim (2000). Loi fédérale sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses. 813.1. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **813.1**: 22.
- LCO2 (1999). Loi fédérale sur la réduction des émissions de CO2. 614.71. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **614.71**: 6.
- LDG (2006). Loi sur la gestion des déchets. 814.11. Lausanne, Canton de Vaud. **814.11**.
- LEaux (1991). Loi fédérale sur la protection des eaux. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **814.20**: 32.
- Ledoux, L., Lock, P., Wolff, P., et al. (2007). Measuring progress towards a more sustainable Europe. Luxembourg, Eurostat: 313.
- Lee, H.-S., Lee, J.-Y. and Yu, M.-Y. (2003). "Influence of iron oxide pigments on the properties of concrete interlocking blocks." Cement and Concrete Research **33**(11): 1889-1896.
- LEne (1998). Loi sur l'énergie. 730.0. Berne, Assemblée Fédérale, Confédération helvétique. **730.0**: 16.
- LEnGE (1986). Loi sur l'énergie. L 2 30. Genève, Grand Conseil genevois. **L 2 30**.
- LFo (1991). Loi fédérale sur les forêts. 921.0. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **921.0**: 20.
- LGD (1999). Loi sur la gestion des déchets. L 1 20. Genève, Grand Conseil genevois. **L 1 20**: 10.
- Lifset, R. and Graedel, T. E. (2002). Industrial ecology: goals ad definitions. A Handbook of Industrial Ecology. R. U. Ayres and L. W. Ayres. Cheltenham, Edward Elgar Publishing: 3 - 15.
- Liu, Q., Li, H.-m., Zuo, X.-l., et al. (2009). "A survey and analysis on public awareness and performance for promoting circular economy in China: A case study from Tianjin." Journal of Cleaner Production **17**(2): 265-270.
- Liu, Y., Chen, J., Mol, A. P. J., et al. (2007). "Comparative analysis of phosphorus use within national and local economies in China." Resources, Conservation and Recycling **51**(2): 454-474.
- Lowe, E. A. (1997). "Creating by-product resource exchanges: Strategies for eco-industrial parks." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 57-65.

- Lowe, E. A. (2001). Eco-industrial Park Handbook for Asian Developing Countries. Report to Asian Development Bank, Indigo Development: 309.
- Lowe, E. A. and Evans, L. K. (1995). "Industrial ecology and industrial ecosystems." Journal of Cleaner Production **3**(1-2): 47-53.
- Lowe, E. A., Moran, S. R. and Holmes, D. B. (1996). Fieldbook for the Development of Eco-Industrial Parks, Indigo Development & Research Triangle Institute.
- Lowitt, P. C. (2008). "Devens Redevelopment." Journal of Industrial Ecology **12**(4): 497-500.
- LPE (1983). Loi fédérale sur la protection de l'environnement. Berne, Assemblée fédérale, Confédération helvétique. **814.01**: 44.
- Lyons, D. (2007). "A spatial analysis of loop closing among recycling, remanufacturing, and waste treatment firms in Texas." Journal of Industrial Ecology **11**(1): 43-54.
- Marano, R. S., Smolenski, D. J., Buschow, K. H. J., et al. (2001). Cutting Fluids for Machining. Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Oxford, Elsevier: 1934-1940.
- Marechal, F., Favrat, D. and Jochem, E. (2005). "Energy in the perspective of the sustainable development: The 2000W society challenge." Resources, Conservation and Recycling **44**(3): 245-262.
- Marechal, F. and Kalitventzeff, B. (1998). "Energy integration of industrial sites: tools, methodology and application." Applied Thermal Engineering **18**(11): 921-933.
- Massard, G. (2004). Characterisation of Hup+ derivatives of Rhizobium leguminosarum bv. viciae strain 3841. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 97.
- Massard, G. (2008). Projet genevois de symbioses industrielles, rapport d'activité 2006 - 2008. Genève, Groupe de travail Ecosite, Direction générale de l'environnement: 75.
- Massard, G., Adoue, C. and Erkman, S. (2007). An information platform to optimize industrial systems at the regional level. Proceedings from the 4th Industrial Symbiosis Research Symposium, Toronto, Canada.
- Massard, G. and Erkman, S. (2009). A web-GIS tool for industrial symbiosis - Preliminary results and perspectives. 23rd International Conference on Informatics for Environmental Protection. Berlin, Shaker Verlag. **2**: 269 - 276.
- Massard, G., Viquerat, A. and Erkman, S. (2009). Detecting industrial symbiosis using a GIS based tool. Presentation for the 5th International Society for Industrial Ecology Conference, Lisbon, Portugal.
- Mayerat Demarne, A.-M. and Kolher, F. (2007). Flux de matières en Suisse: consommation de ressources par l'économie suisse en 1990 et 2005. Statistique de la Suisse. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique: 32.
- Meadows, D. (1998). Indicators and Information Systems for Sustainable Development. Hartland, The Sustainability Institute: 78.

- Melo, M. T., Nickel, S. and Saldanha-da-Gama, F. (2009). "Facility location and supply chain management - A review." European Journal of Operational Research **196**(2): 401-412.
- Mirata, M. (2004). "Experiences from early stages of a national industrial symbiosis programme in the UK: determinants and coordination challenges." Journal of Cleaner Production **12**: 967 - 983.
- Mirata, M. (2005). "Industrial Symbiosis - A tool for more sustainable regions?" Ph.D Thesis.
- Mirata, M. and Emtairah, T. (2005). "Industrial symbiosis networks and the contribution to environmental innovation: The case of the Landskrona industrial symbiosis programme." Journal of Cleaner Production **13**(10-11): 993 - 1002.
- Morère, J.-L. and Pujol, R. (2003). Dictionnaire raisonné de biologie. Paris, Frison-Roche: 1222.
- Mulder, E., de Jong, T. P. R. and Feenstra, L. (2007). "Closed Cycle Construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste." Waste Management **27**(10): 1408-1415.
- Newcombe, K., Kalma, J. and Aston, A. (1978). "The metabolism of a city: the case of Hong Kong." Ambio **7**: 3-15.
- Nielsen, S. N. (2007). "What has modern ecosystem theory to offer to cleaner production, industrial ecology and society? The views of an ecologist." Journal of Cleaner Production **15**(17): 1639-1653.
- Nigam, P. (2007). A Process Based Approach to Industrial Symbiosis and Modeling of Industrial Systems: Conceptual Design and Critical Analysis of A Process-based Tool. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 58.
- NISP (2009). The Pathway To A Low Carbon Sustainable Economy. P. Layborn and M. Morrissey. Birmingham, NISP: 92.
- Nobel, C. E. (1998). A model for industrial water reuse: a GIS approach to industrial ecology. Center for research in water resources. Austin, The University of Texas. **Thèse de doctorat**: 142.
- Nobel, C. E. and Allen, D. T. (2000). "Using Geographic Information Systems in industrial water reuse modelling." Trans IChemE **78**(Part B): 295 - 303.
- Obernosterer, R. and Brunner, P. H. (1998). Materials accounting as a tool for decision making in environmental policy - Case study report 1: Urban metabolism of the city of Vienna. Vienna, Vienna University of Technology, Institute for water quality and waste management.
- OCDE (2010). Interim Report of the Green Growth Strategy: Implementing our commitment for a sustainable future. Meeting of the OECD Council at Ministerial Level. Paris, OCDE: 92.
- OChim (2005). Ordonnance sur la protection contre les substances et les préparations dangereuses. Berne, Administration fédérale, Confédération helvétique. **813.11**: 78.
- OCO2 (2007). Ordonnance sur la taxe sur le CO2. 641.712. Berne, Administration fédérale, Confédération helvétique. **641.712**: 12.
- OCOV (1997). Ordonnance sur la taxe d'incitation sur les composés organiques volatils. 814.018. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **814.018**: 22.

- OCSTAT (2008). Economie genevoise. OCSTAT. Genève, OCSTAT: 33.
- OEaux (1998). Ordonnance sur la protection des eaux. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **814.201**.
- OENE (1998). Ordonnance sur l'énergie. 730.01. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **730.01**: 66.
- OEng (2001). Ordonnance sur la mise en circulation des engrais. Berne, Conseil Fédéral, Confédération helvétique. **916.171**: 24.
- OESPA (2004). Ordonnance du 23 juin 2004 concernant l'élimination des sous-produits animaux. Berne, Conseil fédéral, Confédération Helvétique: 36.
- OFE (1995). Ordonnance sur les épizooties. Berne, Conseil Fédéral, Confédération helvétique. **916.401**: 122.
- OFEFP (1999). Directive pour la valorisation, le traitement et le stockage des matériaux d'excavation et déblais. Berne, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Confédération helvétique: 20.
- OFEFP (2005). Directive sur l'élimination des déchets dans les cimenteries. Berne, Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage, Confédération helvétique: 34.
- OFEN, OFAG, ARE, et al. (2009). Stratégie relative à la production, la transformation et l'utilisation de biomasse en Suisse. Berne, OFEN, OFAG, ARE, OFEV, Confédération helvétique: 10.
- OFEV (2008). Plan d'action bois 2009 - 2012. Berne, Office fédéral de l'environnement, Confédération helvétique: 10.
- OFEV and Schenk, K. (2006). Directive pour la valorisation des déchets de chantier minéraux. OFEV. Berne, Office fédéral de l'environnement, Confédération helvétique: 34.
- OFFT (2010). Masterplan Cleantech en Suisse. Berne, Office fe de ral de la formation professionnelle et de la technologie: 109.
- OFS (2008). NOGA 2008: Nomenclature générale des activités économiques - Titres. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, Confédération helvétique: 82.
- OFS (2008). NOGA 2008: Nomenclature générale des activités économiques - Introduction. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, Confédération helvétique: 34.
- OFS (2008). NOGA 2008: Nomenclature générale des activités économiques - Notes explicatives. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, Confédération helvétique: 248.
- OMoD (2005). Ordonnance sur les mouvements de déchets. 814.610. Berne, Conseil Fédéral, Confédération helvétique. **814.610**: 26.
- OPair (1985). Ordonnance sur la protection de l'air. Berne, Conseil Fédéral, Confédération helvétique. **814.318.142.1**: 88.
- OPAM (1991). Ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **814.012**: 30.

- Orée (2008). Mettre en oeuvre une démarche d'écologie industrielle sur un parc d'activités. Paris, DPE / SAP.
- ORRChim (2005). Ordonnance sur la réduction des risques liés à l'utilisation de substances, de préparations et d'objets particulièrement dangereux. Berne, Conseil Fédéral, Confédération helvétique. **814.81**: 114.
- OSol (1998). Ordonnance sur les atteintes portées au sol. 814.12. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **814.12**: 12.
- OTD (1990). Ordonnance sur le traitement des déchets. Berne, Conseil fédéral, Confédération helvétique. **814.600**: 34.
- Outters, M. (2006). Guide de recommandations pour la planification et la gestion des zones industrielles avec l'écologie industrielle, Ecosind: 326.
- Özyurt, D. B. and Realf, M. J. (2002). "Combining a Geographical Information System and Process Engineering to Design an Agricultural-Industrial Ecosystem." Journal of Industrial Ecology **5**(3): 13 - 31.
- Paquin, R. and Howard-Grenville, J. A. (2009). Facilitating regional industrial symbiosis: network growth in the UK's national industrial symbiosis programme. The social embeddedness of industrial ecology. F. A. Boons and J. A. Howard-Grenville. Cheltenham, UK, Edward Elgar: 103 - 127.
- Park, H.-S., Rene, E. R., Choi, S.-M., et al. (2008). "Strategies for sustainable development of industrial park in Ulsan, South Korea-From spontaneous evolution to systematic expansion of industrial symbiosis." Journal of Environmental Management **87**(1): 1-13.
- Park, H.-S. and Won, J.-Y. (2007). "Ulsan Eco-industrial Park: Challenges and Opportunities." Journal of Industrial Ecology **11**(3): 11-13.
- Pasqualino, J. C., Meneses, M., Abella, M., et al. (2009). "LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant." Environmental Science & Technology **American Chemical Society**(43): 9.
- Peck, P. (2003). Interest in Material Cycle Closure? Exploring evolution of industry's responses to high grade recycling from an industrial ecology perspective. The International Institute for Industrial Environmental Economics. Lund, Lund University. **Thèse de doctorat**: 318.
- Peng, Y.-z., Ma, Y. and Wang, S.-y. (2007). "Denitrification potential enhancement by addition of external carbon sources in a pre-denitrification process." Journal of Environmental Sciences **19**(3): 284-289.
- Phillips, P. S., Barnes, R., Bates, M. P., et al. (2006). "A critical appraisal of an UK county waste minimisation programme: The requirement for regional facilitated development of industrial symbiosis/ecology." Resources, Conservation and Recycling **46**(3): 242-264.
- Plancherel, A. (2006). Valorisation des SIG pour la détection de synergies éco-industrielles. Master thesis EPFL. Lausanne, EPFL. **msc**.

- Pongrácz, E. and Pohjola, V. J. (2004). "Re-defining waste, the concept of ownership and the role of waste management." Resources, Conservation and Recycling **40**(2): 141-153.
- Porter, M. (1986). L'avantage concurrentiel. Paris, InterEditions.
- Posch, A. (2010). "Industrial Recycling Networks as Starting Points for Broader Sustainability-Oriented Cooperation?" Journal of Industrial Ecology **14**(2): 242-257.
- Potts Carr, A. J. (1998). "Choctaw Eco-Industrial Park: an ecological approach to industrial land-use planning and design." Landscape and Urban Planning **42**(2-4): 239-257.
- Prélaz-Droux, R. (1995). Conception d'un système d'information à référence spatiale pour l'aménagement et de gestion du territoire. Approche systémique et procédure de réalisation. Département de Génie rural. Lausanne, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne. **Thèse de doctorat**: 233.
- Purtschert, I. and Gujer, W. (1999). "Population dynamics by methanol addition in denitrifying wastewater treatment plants." Water Science and Technology **39**(1): 43-50.
- Purtschert, I., Siegrist, H. and Gujer, W. (1996). "Enhanced denitrification with methanol at WWTP Zürich-Werdhölzli." Water Science and Technology **33**(12): 117-126.
- Quintas, P., Lefrere, P. and G., J. (1997). "Knowledge Management: A Strategic Agenda." Long Range Planning **30**(3): 385 - 391.
- REnGE (1988). Règlement d'application de la loi sur l'énergie. L 2 30.01. Genève, Conseil d'Etat genevois. **L 2 30.01**.
- Renou, S., Thomas, J. S., Aoustin, E., et al. (2008). "Influence of impact assessment methods in wastewater treatment LCA." Journal of Cleaner Production **16**(10): 1098-1105.
- Reuter, M. A. (1998). "The simulation of industrial ecosystems." Minerals Engineering **11**(10): 891-918.
- Richards, D. J. and Gladwin, T. N. (1999). "Sustainability metrics for the business enterprise." Environmental Quality Management **8**(3): 11-21.
- Ridoutt, B. G., Eady, S. J., Sellahewa, J., et al. (2009). "Water footprinting at the product brand level: case study and future challenges." Journal of Cleaner Production **17**(13): 1228-1235.
- Roduit, J. (2006). Dépenses de protection de l'environnement des entreprises, résultats de l'enquête 2003. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, Confédération helvétique: 43.
- Ruegg, J. (2000). Zonage et propriété foncière. Paris, ADEF: 256.
- Ruth, M. and Davidsdottir, B. (2009). The Dynamics of Regions and Networks in Industrial Ecosystems. Cheltenham, UK, Edward Elgar: 238.
- Sathre, R. and Grdzlishvili, I. (2006). "Industrial symbiosis in the former Soviet Union." Progress in Industrial Ecology, An International Journal **3**: 379-392.
- ScanE (2005). Plan directeur cantonal de l'énergie 2005-2009. Genève, Département du territoire, Etat de Genève: 106.

- Schäfer, G., Baryn, M., Fritz, M., et al. (2008). L'europe en chiffres: annuaire Eurostat 2008. Luxembourg, Eurostat: 566.
- Schmid, M. (2008). Besoins matériels de la Suisse: statistique suisse de l'environnement n°14. Statistique de la Suisse. Neuchâtel, Office fédéral de la statistique, Confédération helvétique: 28.
- Schmid Naset, T.-S., Bader, H.-P., Scheidegger, R., et al. (2008). "The flow of phosphorus in food production and consumption -- Linköping, Sweden, 1870-2000." Science of The Total Environment **396**(2-3): 111-120.
- Schoenenberger, A. and Arnold, C. (2004). Etude des aspects économiques et financiers de l'usage de graves recyclées dans le canton de Genève. Genève, Eco'diagnostic: 101.
- Schwarz, E. J. and Steininger, K. W. (1997). "Implementing nature's lesson: The industrial recycling network enhancing regional development." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 47-56.
- SECO (2008). La politique régionale de la Confédération. Berne, Secrétariat d'Etat à l'économie, Confédération helvétique: 24.
- Seppälä, J., Melanen, M., Mäenpää, I., et al. (2005). "How Can the Eco-efficiency of a Region be Measured and Monitored?" Journal of Industrial Ecology **9**(4): 117-130.
- Shi, H., Chertow, M. and Song, Y. (2010). "Developing country experience with eco-industrial parks: a case study of the Tianjin Economic-Technological Development Area in China." Journal of Cleaner Production **18**(3): 191-199.
- Siddique, R. and Naik, T. R. (2004). "Properties of concrete containing scrap-tire rubber - an overview." Waste Management **24**(6): 563-569.
- Siddique, R. and Noumowe, A. (2008). "Utilization of spent foundry sand in controlled low-strength materials and concrete." Resources, Conservation and Recycling **53**(1-2): 27-35.
- Siddique, R., Schutter, G. d. and Noumowe, A. (2009). "Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete." Construction and Building Materials **23**(2): 976-980.
- SIG (2007). Assainissement des eaux usées, rapport d'exploitation 2007. Genève, Services Industriels de Genève: 18.
- SPE (1999). Un Agenda 21 pour Genève: 21 actions pour rentrer dans le XXIème siècle. Genève, Société pour la Protection de l'environnement, Département de l'action sociale et de la santé, Etat de Genève: 90.
- SPE (1999). Un Agenda 21 pour Genève: A.2. Le résultat des consultation. Genève, Société pour la Protection de l'environnement, Département de l'action sociale et de la santé, Etat de Genève: 49.
- Spoerri, A., Lang, D. J., Staeubli, B., et al. (2010). "Technological change in Swiss thermal waste treatment: An expert-based socio-technical analysis." Waste Management **30**(7): 1382-1394.
- Sterr, T. and Ott, T. (2004). "The industrial region as a promising unit for eco-industrial development - reflections, practical experience and establishment of innovative instruments to support industrial ecology." Journal of Cleaner Production **12**: 947-965.

- Stigler, M. (2008). L'approche de l'écologie industrielle et les synergies sous l'angle économique. Rapport de service civil. Lausanne, Université de Lausanne: 92.
- Stokes, J. and Horvath, A. (2006). "Life Cycle Energy Assessment of Alternative Water Supply Systems (9 pp)." The International Journal of Life Cycle Assessment **11**(5): 335-343.
- Stucki, G. (2007). Case Studies to Recycle Materials from the Manufacturing Industry. R'07 World Congress, Davos, Switzerland, EMPA / STAW.
- Stulz, R. and Pandocchi, D. (2006). Conception Générale de l'énergie 2005-2009. Genève, Service cantonal de l'énergie: 38.
- Sukontasukkul, P. (2009). "Use of crumb rubber to improve thermal and sound properties of pre-cast concrete panel." Construction and Building Materials **23**(2): 1084-1092.
- Taylor, T. and Humpstone, C. (1972). The Restoration of the Earth. New York, Harper and Row.
- Tibbs, H. (1993). Industrial Ecology - An Environmental Agenda for Industry. Global Business Network. CA.
- Turgut, P. and Murat Algin, H. (2007). "Limestone dust and wood sawdust as brick material." Building and Environment **42**(9): 3399-3403.
- Udoeyo, F. F. and Dashibil, P. U. (2002). "Sawdust Ash as Concrete Material." Journal of Materials in Civil Engineering **14**(2): 173-176.
- Udoeyo, F. F., Inyang, H., Young, D. T., et al. (2006). "Potential of Wood Waste Ash as an Additive in Concrete." Journal of Materials in Civil Engineering **18**(4): 605-611.
- UNEP (1994). Government Strategies and Policies for Cleaner Production. Cleaner Production Programme. Paris, United Nations Environment Programme.
- UNEP and UNIDO (2004). Guidance Manual: How to Establish and Operate Cleaner Production Centres, UNEP et UNIDO: 231.
- Urkiaga, A., de las Fuentes, L., Bis, B., et al. (2008). "Development of analysis tools for social, economic and ecological effects of water reuse." Desalination **218**(1-3): 81-91.
- Urkiaga, A., de las Fuentes, L., Bis, B., et al. (2006). "Methodologies for feasibility studies related to wastewater reclamation and reuse projects." Desalination **187**(1-3): 263-269.
- van Beers, D. (2006). Capturing Regional Synergies in the Kwinana Industrial Area - 2006 Status Report, Centre for Sustainable Resource Processing: 105.
- van Beers, D. (2008). Capturing Regional Synergies in the Kwinana Industrial Area - 2008 Status Report. Kwinana, Centre for Sustainable Resource Processing, Centre of Excellence in Cleaner Production, Curtin University of Technology: 144.
- van Beers, D. and Biswas, W. K. (2008). "A regional synergy approach to energy recovery: The case of the Kwinana industrial area, Western Australia." Energy Conversion and Management **49**(11): 3051-3062.

- van Beers, D., Bossilkov, A. and van Berkel, R. (2005). Capturing Regional Synergies in the Kwinana Industrial Area - 2005 Status Report, Centre for Sustainable Resource Processing, Centre of Excellence in Cleaner Production, Curtin University of Technology.
- van Beers, D., Bossilkov, A. and van Berkel, R. (2006). Enhancing Water Efficiency Through Regional Cooperation - The Case of Kwinana. Proceedings from the Water in Mining Conference, Brisbane, Australia.
- van Beers, D., Corder, G., Bossilkov, A., et al. (2007). "Industrial Symbiosis in the Australian Minerals Industry: The Cases of Kwinana and Gladstone." Journal of Industrial Ecology **11**(1): 55-72.
- van Berkel, R. (2007). "Cleaner production and eco-efficiency initiatives in Western Australia 1996-2004." Journal of Cleaner Production **15**(8-9): 741-755.
- van Berkel, R. (2007). "Eco-efficiency in the Australian minerals processing sector." Journal of Cleaner Production **15**: 772 - 781.
- van Berkel, R., Bossilkov, A. and Harris, S. (2006). Opportunities and Constraints for Regional Resource Synergies in Minerals Processing Regions. Proceedings from the Green Processing Conference, Newcastle, Australia.
- van Berkel, R., Fujita, T., Hashimoto, S., et al. (2009). "Quantitative Assessment of Urban and Industrial Symbiosis in Kawasaki, Japan." Environmental Science & Technology **43**(5): 1271-1281.
- van Berkel, R., Fujita, T., Hashimoto, S., et al. (2009). "Industrial and urban symbiosis in Japan: Analysis of the Eco-Town program 1997-2006." Journal of Environmental Management **90**(3): 1544-1556.
- van Berkel, R., van Beers, D. and Bossilkov, A. (2005). Regional Resource Synergies for Sustainable Development: the case of Kwinana. Proceedings from the Materials and Testing: Science, Technology and Applications Conference, Fremantle, Australia.
- van Berkel, R., Willems, E. and Lafleur, M. (1997). "Development of an industrial ecology toolbox for the introduction of industrial ecology in enterprises - I." Journal of Cleaner Production **5**(1-2): 11-25.
- van Berkel, R., Willems, E. and Lafleur, M. (1997). "The Relationship between Cleaner Production and Industrial Ecology." Journal of Industrial Ecology **1**(1): 51-66.
- Vince, F., Aoustin, E., Bréant, P., et al. (2008). "LCA tool for the environmental evaluation of potable water production." Desalination **220**: 37-56.
- Viquerat, A. (2008). Application des systèmes d'information géographique à la détection de symbioses éco-industrielles. Section des Sciences et Ingénierie de l'Environnement. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. **Mémoire de master**: 99.
- Wang, T., Jiansu, M., Johnson, J., et al. (2008). "Anthropogenic metal cycles in China." Journal of Material Cycles and Waste Management **10**: 188 - 197.
- Warren-Rhodes, K. and Koenig, A. (2001). "Escalating Trends in the Urban Metabolism of Hong-Kong: 1971-1997." Ambio: A journal of the Human Environment: 429-438.

WBCSD (2000). Eco-efficiency: creating more value with less impact. Geneva, World Business Council for Sustainable Development: 32.

Yilmaz, A. and Degirmenci, N. (2009). "Possibility of using waste tire rubber and fly ash with Portland cement as construction materials." Waste Management **29**(5): 1541-1546.

Zhang, K., Wen, Z. and Peng, L. (2007). "Environmental Policies in China: Evolvement, Features and Evaluation." China Population, Resources and Environment **17**(2): 1-7.

Zhou, L., Hu, S., Li, Y., et al. (2008). "Study on co-feed and co-production system based on coal and natural gas for producing DME and electricity." Chemical Engineering Journal **136**(1): 31-40.

Zhu, Q. and Côté, R. P. (2004). "Integrating green supply chain management into an embryonic eco-industrial development: a case study of the Guitang Group." Journal of Cleaner Production **12**(8-10): 1025 - 1035.

Zhu, Q., Lowe, E. A., Wei, Y.-a., et al. (2007). "Industrial Symbiosis in China, A case Study of the Guitang Group." Journal of Industrial Ecology **11**(1): 1 - 12.

Zuh, Q., Lowe, E. A., Wei, Y.-a., et al. (2007). "Industrial Symbiosis in China, A case Study of the Guitang Group." Journal of Industrial Ecology **11**(1): 1 - 12.

ANNEXE 1 :

Liste des projets de symbioses industrielles en cours ou achevés dans le monde

Un grand nombre de projets existent en Europe et les activités de recherche s'intensifient. L'expérience la plus célèbre est bien entendu celle de la municipalité de Kalundborg au Danemark (Ehrenfeld et Gertler 1997; Jacobsen et Anderberg 2004; Jacobsen 2006). Il s'agit d'un projet largement documenté, présenté en détail dans la Section 1.4.6.1. Parmi les pays précurseurs, les Pays-Bas mènent également des projets de parcs éco-industriels à Moerdijk et sur le périmètre du Port de Rotterdam (Baas 1998; Baas 2000; Baas et Boons 2004; Baas 2008; Baas et Huisinsh 2009). Plus récemment, le Royaume-Unis s'est illustré en lançant le National Industrial Symbiosis Programme (NISP) qui constitue aujourd'hui le seul programme national en Europe dédié aux symbioses industrielles et au développement éco-industriel (Mirata 2004; NISP 2009; Paquin et Howard-Grenville 2009). Il est détaillé dans la Section 1.4.6.2.

Plus proche de nous, la France mène depuis quelques années de nombreux projets dans les régions de l'Aube (Adoue 2004; Brulot-Dermine 2006; 2009), de Dunkerque (Ecopal, Nord), de Lille (Nord), de Savoie (Savoie Technolac, Plaine de l'Ain) et de la Vallée de la chimie. Les zones industrielles de Grand Troyes et Torvilliers (Aube) de Pouzin (Ardèche), Lagny-sur-Marne (Seine et Marne), du port autonome de Marseille (Bouches du Rhône) sont également impliquées, tout comme des entreprises privées à l'image Yprema. D'autres projets sont en cours de développement grâce à plusieurs programmes de recherche à l'échelle nationale (Orée 2008; Brulot-Dermine 2009)

De nombreux autres projets existent en Suède, à Landskrona (Mirata et Emtairah 2005), en Norvège, à Ora, en Finlande, essentiellement à Jyväskylä et Joensuu (Korhonen 2001; Korhonen, Wihersaari et al. 2001; Korhonen 2002; Korhonen, Niemeläinen et al. 2002), en Allemagne à Pfaffengrund, près de la ville de Heidelberg (Sterr et Ott 2004; Adamides et Mouzakitis 2009) et dans le parc industriel de Gersthofen⁶², en Autriche, dans la région de Styrie et plus générale au sein des industries du secteur secondaire en Autriche (Schwarz et Steiningner 1997; Posch 2010), ainsi qu'au Portugal (Costa et Ferrão 2010). Un guide technique réalisé avec le soutien de l'Union Européenne décrit également des expériences naissantes en Espagne, en Italie et en Grèce (Outters 2006).

Les approches utilisées pour ces projets varie fortement, peu d'études comparent les actions entreprises et le contexte dans lequel elles ont été menées. Benoit Duret (2007) propose un retour d'expérience de plusieurs projets européens et nord américain. Dans le cadre de cette recherche, nous avons participé à une recherche destinée à comparer le contexte législatif des projets mené au Royaume-Uni, au Danemark, au Portugal et en Suisse (Costa, Massard et al. 2010).

⁶² <http://www.csrp.com.au/database/index.html>, site consulté le 10 mai 2010.

Deuxième région du monde très active dans le domaine des symbioses industrielles, les Etats-Unis ont été précurseurs dans le développement des parcs éco-industriel et dans le développement éco-industriel. Au cours des années 90, plusieurs municipalités, villes et régions ont mis en place des projets de parcs éco-industriels. En 1997, l'agence américaine de protection de l'environnement (US EPA) listait plus de 53 états ou régions des Etats-Unis impliqués dans des projets destinés à faciliter les échanges de co-produits (Lowe 1997). Certaines de ces expériences ont fait l'objet de recherches et de publications académiques (Côté et Hall 1995; Côté et Cohen-Rosenthal 1998; Erkman 1998; Heeres, Vermeulen et al. 2004; Gibbs et Deutz 2005) : Gulf Coast By-product Synergy Project, Freeport (Francis 2003) et Bayport Industrial complex, Pasadena (Nobel 1998), Texas ; Londonderry, New Hampshire ; Phillips Eco Entreprise Center Minnesota ; Port of Cape Charles Sustainable Technology Park, Virginie ; Fairfield, Baltimore et Shady Side, Maryland ; Brownsville, Texas ; Riverside, Burlington, Vermont (IE 1998) ; Chattanooga, Tennessee ; Green Institute, Minneapolis, Minnesota ; Plattsburgh, New York ; East Shore, Oakland, California ; Trenton, New Jersey ; Civano, Tucson, Arizona ; Franklin, Youngsville, Caroline du Nord ; Raymond et Skagit County, Washington ; Triangle J Council (Kincaid et Overcash 2001) et Choctaw, Oklahoma (Potts Carr 1998). Récemment, la zone industrielle de Devens a fait parler d'elle pour son projet de développement éco-industriel réussi (Lowitt 2008).

Au Canada, le cas de Burnside Industrial Park, Dartmouth, Nova Scotia est une des premières expériences de recherche systématique de symbioses industrielles à l'échelle d'un parc. Il est également un des mieux référencé (Côté et Hall 1995; Côté, Booth et al. 2006; Côté, Lopez et al. 2008), mais d'autres projets existent dans l'Etat d'Alberta, à Montréal, Golden Horseshoe, Saint-John et Sarnia-Lambton⁶³, ainsi que près de Toronto, dans le Bruce Eco-industrial Park (Côté et Cohen-Rosenthal 1998)⁶⁴.

En Amérique Centrale et du Sud, des projets existent à Puerto Rico, dans les villes de Barceloneta et de Guayama (Chertow et Lombardi 2005; Ashton 2008; Chertow et Ashton 2009) et plus récemment au Brésil, à Rio de Janeiro dans le parcs industriels de Santa Cruz et Paracambi (Elabras Veiga et Magrini 2009).

Les projets de développement éco-industriel sont également en cours en Asie depuis la fin des années 90. Au cours des dix dernières années, des projets ont été identifiés en Australie, en Chine, aux Philippines, en Indonésie, en Inde, en Malaisie, au Japon, en Corée, à Taiwan, au Vietnam, en Thaïlande, à Singapour et au Sri Lanka (Lowe 2001; Erkman et Ramaswamy 2003; Chiu et Yong 2004; Chiu, Ward et al. 2009).

Ces dernières années, la symbiose industrielle du Guitang Group, dans la région autonome chinoise de Guangxi Zhuang, en Chine, a fait l'objet de plusieurs publications académiques (Zhu et Côté 2004; Geng, Haight et al. 2007; Zhu, Lowe et al. 2007). Cette expérience est détaillée dans la Section 1.4.6.3. La zone

⁶³ <http://www.csrp.com.au/database/index.html>, site consulté le 10 mai 2010.

⁶⁴ <http://www.bruce-eco.com/>, site consulté le 10 mai 2010.

de développement économique de Tianjin (TEDA), dans la baie de Bohai, au nord de la Chine, est également bien documentée pour sa transformation en parc éco-industriel (Geng 2005; Geng et Jun 2006; Geng, Zhu et al. 2007; Shi, Chertow et al. 2010). Le Guitang Group et TEDA sont des exemples de parcs éco-industriels incluant des symbioses industrielles qui existent actuellement en Chine. Yiping Fang, Raymond P. Côté et Rong Qin (2007) en ont identifié 13 autres au cours de l'année 2007. Le chiffre semble bien supérieur aujourd'hui, selon Yong Geng, Pan Zhuang, Raymond P. Côté et Tsuyoshi Fujita (2009), il en existerait plus de 100, dont 26 ont été sélectionnés comme projets pilotes par la State Environmental Protection Administration (SETA), mais les résultats réels de certains projets restent parfois difficiles à vérifier. C'est dans le but d'améliorer l'évaluation des projets en cours que la SETA a mis au point un standard pour l'évaluation des parcs éco-industriels (Geng, Zhang et al. 2009).

Au Japon, 26 projets d'*Eco-town* se sont développés depuis l'année 2000. Les objectifs de gestion des déchets proposés dans ce programme national incluent la mise en place de symbioses industrielles (Fujita 2006; van Berkel, Fujita et al. 2009; Geng, Tsuyoshi et al. 2010). Ce projet est détaillé dans la Section 1.4.6.4. D'autres pays d'Asie bénéficient aujourd'hui de l'expérience japonaise, comme la Corée qui a développé un plan national pour le développement de parcs éco-industriels sur l'ensemble de son territoire (Kim 2002; Kang 2006; Park et Won 2007; Park, Rene et al. 2008), en particulier dans les villes de Ulsan, Banwol, Siwha, Mipo, Onsan, Yeosu, Chungju, Jinhae, Haman, Jinju et Pohang (Section 1.4.6.5).

Les Philippines ont également fait plusieurs tentatives pour développer des parcs éco-industriels. Il s'agit même d'une des premières expériences dans le contexte asiatique (Lowe 2001). Ces projets ont été menés sous l'égide du PNUE, de l'Université de Yale et de l'US-EPA, en collaboration avec le Ministère philippin du commerce et de l'industrie (Chiu et Yong 2004). Le principal projet mené à la fin des années 1990 était le projet PRIME.

Finalement, en Australie, pays possédant d'abondantes ressources naturelles, deux projets particulièrement intéressants ont été largement documentés ces dernières années. Il s'agit des zones industrielles de Kwinana et de Gladstone (van Berkel, van Beers et al. 2005; van Beers, Bossilkov et al. 2006; van Beers, Corder et al. 2007; van Beers 2008; van Beers et Biswas 2008). L'émergence des symbioses industrielles est décrite dans la Section 1.4.6.6.

ANNEXE 2 :

Développement d'un système d'indicateurs pour évaluer la faisabilité et la pertinence d'une symbiose industrielle

Dans les chapitres 2 et 4, nous avons mentionné les réflexions pour créer un système d'indicateurs permettant de noter et de classer les symbioses industrielles potentielles. L'objectif de cette ébauche d'un système d'indicateurs est d'évaluer la faisabilité et la pertinence des symbioses industrielles pour plusieurs familles de flux englobant l'ensemble des pistes de synergie détectées. Le système développé n'ayant pas abouti, il a été décidé de le présenter en annexe et non dans le corps de la recherche. Lors des recherches sur les symbioses industrielles potentielles par famille de flux (Chapitre 4), cette ébauche de référentiel a été utilisée pour classer les pistes de synergies et détailler leur faisabilité. Cette annexe a pour objectif de présenter les éléments développés ainsi que leur application à l'analyse par famille de flux.

Un indicateur de premier ordre, qualitatif, a été développé pour évaluer la faisabilité légale. En ce qui concerne la faisabilité technique et économique, ainsi que dans le cas de l'évaluation de la pertinence environnementale, il s'agira également d'indicateurs de type qualitatif. Cependant, dans ces cas, la faisabilité et la pertinence sont en réalité subordonnées à d'autres indicateurs quantitatifs qui ne seront pas abordés en détail ici.

Il apparaît comme nécessaire que les résultats soient traduits en un élément facilement appréhendable par les acteurs concernés. Le résultat de chaque indicateur est transcrit sur une échelle d'analyse entre 0 et 25. L'agrégation des indicateurs en un indicateur faisabilité globale aboutit ainsi à une notation sur 100.

Echelle d'analyse de l'indicateur de faisabilité technique

Les considérations précédentes permettent de dresser une échelle qualitative pour la faisabilité technique des synergies. Celle-ci est basée sur la complexité de la faisabilité, depuis la faisabilité souhaitable et réalisable sans adaptation, jusqu'aux éléments éliminatoires (Tableau 33). L'échelle qualitative est basée sur les éléments présentés dans la Section 2.4.1.

Tableau 33 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité technique. Source : auteur.

0	5	10	15	20	25
Non-réalisable avec l'état de la technique actuelle	Très difficilement réalisable avec l'état de la technique actuelle	Difficilement réalisable même avec une adaptation technique	Adaptation technique nécessaire	Réalisable sous condition mais sans adaptation technique	Techniquement réalisable sans condition

	Eliminatoire - irréalisable
	Réalisation difficile, mais pas éliminatoire
	Réalisation possible
	Réalisation souhaitable
	Incitation à la réalisation

Echelle d'analyse de l'indicateur de faisabilité légale

Les considérations précédentes et la description de la législation suisse des déchets permettent de dresser une échelle qualificative pour la faisabilité légale des synergies. Celle-ci est basée sur l'analyse des lois et ordonnances de la Section 2.4.2. L'échelle d'analyse couvre toutes les situations depuis l'interdiction explicite, jusqu'à la nécessité d'adapté la législation et finalement, les cas dans lesquels des incitations existent pour la mise en place de synergies (Tableau 34).

Tableau 34 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité légale. Source : auteur.

0	5	10	15	20	25
Interdiction légale nominative	Interdiction légale non nominative	Adaptation législative nécessaire	Faisabilité légale sous condition	Pas de barrière légale	Incitation légale existante

	Elément éliminatoire
	Réalisation difficile, mais pas éliminatoire
	Réalisation possible
	Réalisation souhaitable
	Incitation à la réalisation

Echelle d'analyse de l'indicateur de faisabilité économique

Les équations proposées précédemment permettent d'évaluer au cas par cas la faisabilité économique d'une opportunité en se basant sur le modèle développé dans la Section 2.4.3. Quantifier chaque flux financier relatif à une solution dépasse le cadre de ce travail. Certains chiffres ont été donnés dans le Chapitre 4 en fonction des données recueillies dans le cadre des études de cas. L'échelle d'analyse développée ici est destinée à déterminer si les équations proposées seront vérifiées ou non, concluant ainsi à la faisabilité économique ou non d'une solution (Tableau 35).

Tableau 35 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité économique. Source : auteur.

0	5	10	15	20	25
Rentabilité négative Coûts et investissements trop importants	Rentabilité nul ou négligeable Coûts et investissements trop importants	Rentabilité faible Sc1: Fort investissement / coûts élevés Sc2: Valeur marchande faible	Rentabilité moyenne Valeur marchande bien supérieur aux investissement et coûts	Rentabilité forte mais investissement à long terme	Rentabilité forte sans investissement conséquent

	Elément éliminatoire
	Réalisation difficile, mais pas éliminatoire
	Réalisation possible
	Réalisation souhaitable
	Incitation à la réalisation

Echelle d'analyse de la pertinence environnementale

Les considérations du Chapitre 2 et en particulier de la Section 2.4.4 mettent en lumière la nécessité de mettre en place une échelle d'analyse de la pertinence environnementale. Le potentiel environnemental des opportunités est ici analysé par rapport à leur potentiel pour la réduction des impacts environnementaux d'une activité économique ou d'un produit (Tableau 36).

Tableau 36 : Echelle d'analyse pour l'indicateur de faisabilité légale. Source : auteur.

0	5	10	15	20	25
Augmentation des impacts environnementaux < 0	Réduction des impacts environnementaux = 0	Réduction des impacts environnementaux > 0 mais très faible	Réduction des impacts environnementaux > 0 ou Relocalisation de l'utilisation de la ressource > 0	Réduction des impacts environnementaux > 0 et Relocalisation de l'utilisation de la ressource > 0	Réduction des impacts environnementaux globale >> 0

	Élément éliminatoire
	Réalisation difficile, mais pas éliminatoire
	Réalisation possible
	Réalisation souhaitable
	Incitation à la réalisation

Indicateur de faisabilité globale

Le Tableau 37 reprend les échelles de classification définies pour chacun des indicateurs, en leur appliquant un code couleur en fonction de leur influence sur la pertinence globale, identique aux tableaux 16 à 19. Les couleurs ont la signification suivante : le rouge indique les éléments éliminatoires, l'orange ceux qui handicapent fortement la faisabilité, la jaune indique une faisabilité moyenne, le vert clair une réalisation souhaitable et le vert foncé recommande la mise en place de mesures incitatives.

Une fois l'évaluation des quatre indicateurs effectuée et les éléments éliminatoires éventuels identifiés, il est intéressant d'agréger les résultats en un seul indicateur de pertinence globale. Il va de soit que plus un indicateur est agrégé, plus sa lisibilité est faible. Celui-ci a donc pour objectif principal de servir d'outil de communication. L'indicateur de faisabilité globale a donc pour objectif de renseigner en un coup d'œil sur la pertinence d'une synergie, mais ne remplace en aucun cas une analyse de faisabilité complète. Chaque indicateur était évalué sur une échelle de 0 à 25, l'indicateur de faisabilité globale est calculé sur une échelle de 0 à 100. Le Tableau 38 résume la faisabilité globale en fonction du total obtenu en additionnant les résultats des quatre indicateurs de faisabilité et de pertinence.

Un indicateur de faisabilité globale ayant une note entre 0 et 40 indique qu'une synergie est impossible à l'heure actuelle et en l'état de la technique. Celle-ci aura une forte probabilité de présenter un ou plusieurs éléments éliminatoires. Une note de 40 à 60 traduit une réalisation difficile, impliquant un travail d'adaptation technique et légal important et la présence probable, mais non automatique, d'un élément éliminatoire. A partir de 60, la synergie présente un potentiel intéressant. Entre 60 et 80, une analyse de faisabilité poussée est nécessaire pour dépasser les contraintes techniques, légales et économiques résiduelles. Finalement, une note entre 80 et 100 caractérise une synergie pouvant être réalisée et dont la mise en place est fortement souhaitable. Les opportunités de cette catégorie devraient faire l'objet d'une diffusion à large échelle auprès de tous les acteurs économiques.

Tableau 37 : Résumé des échelles de notation et de leur signification pour les quatre indicateurs de faisabilité et de pertinence. Source : auteur.

	Echelle d'analyse					
	0	5	10	15	20	25
Faisabilité technique	Non-réalisable avec l'état de la technique actuelle	Très difficilement réalisable avec l'état de la technique actuelle	Difficilement réalisable même avec une adaptation technique	Adaptation technique nécessaire	Réalisable sous condition mais sans adaptation technique	Techniquement réalisable sans condition
Faisabilité légale	Interdiction légale nominative	Interdiction légale non nominative	Adaptation législative nécessaire	Faisabilité légale sous condition	Pas de barrière légale	Incitation légale existante
Faisabilité économique	Rentabilité négative Coûts et investissements trop importants	Rentabilité nul ou négligeable Coûts et investissements trop importants	Rentabilité faible Sc1: Fort investissement / coûts élevés Sc2: Valeur marchande faible	Rentabilité moyenne Valeur marchande bien supérieur aux investissements et coûts	Rentabilité forte mais investissement à long terme	Rentabilité forte sans investissement conséquent
Pertinence environnementale	Augmentation des impacts environnementaux $x < 0$	Réduction des impacts environnementaux $x = 0$	Réduction des impacts environnementaux $x > 0$ mais très faible	Réduction des impacts environnementaux $x > 0$ ou Relocalisation de l'utilisation de la ressource > 0	Réduction des impacts environnementaux $x > 0$ et Relocalisation de l'utilisation de la ressource > 0	Réduction des impacts environnementaux x globale $>> 0$

	Eliminatoire - irréalisable
	Réalisation difficile, mais pas éliminatoire
	Réalisation possible
	Réalisation souhaitable
	Incitation à la réalisation

Tableau 38 : Signification de l'indicateur de pertinence globale. Source : auteur.

		Echelle d'analyse			
		0 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100
Faisabilité globale		Réalisation impossible selon l'état actuel de la technique	Réalisation difficile - travail d'adaptation technique et légal important	Réalisation possible, voir conseillée, mais soumise à condition	Réalisation fortement conseillée - solution à diffuser
		Eléments éliminatoires			
Eléments éliminatoires		> ou = à 0	0 ou 1	0	0

ANNEXE 3 :

Analyse détaillée des pistes détectées par SymbioGIS pour 12 activités économiques

L'exercice ici de d'étudier la manière dont la base de donnée détecte les correspondances à partir des règles fixées dans la Section 3.3.2. Le but ici n'est pas de détecter ni d'analyser toutes les symbioses industrielles pertinentes dans le contexte Suisse. Les critères d'analyse proposés ici ne sont pas optimisés pour le travail de terrain et présentent certaines incohérences par rapport aux Chapitres 2 et 4. Ils sont néanmoins intéressants pour l'évaluation du script de détection des correspondances de SymbioGIS.

La manière dont la piste a été détectée par SymbioGIS est détaillée en utilisant la grille suivant :

- *Oui*, implique que les synergies correspondant au type considéré ont été détectées et retenues comme réalisables sous certaines conditions définies dans la Section 3.3.2.3 ;
- *Non*, implique qu'aucune synergie correspondant au type considéré n'a été détectée ;
- *Partielle*, lorsque certaines synergies correspondant au type ont été détectées et retenues lors du tri et d'autres, mentionnées explicitement dans l'étude préexistante, ne l'ont pas été ;

Pour chaque type non détecté (*non*, *partielle* et *proche*), la cause a été établie puis classée selon l'une des trois catégories suivantes :

- *Flux absent* se réfère à l'absence d'un flux dans un bilan, alors qu'une synergie avait été détectée dans les études de référence ;
- *Substitution de matériaux* indique que le type de synergie analysé vise à remplacer un matériau par un autre flux capable d'assurer la même fonction, ce qui implique que le flux sortant ne correspondra pas au flux entrant mentionné ;
- *Nomenclature* renvoie à un problème lié à la dénomination des flux ou des composants.

Le détail des causes en cas de non détection ainsi que des commentaires éventuels ont également été inscrits dans le Tableau 39.

Tableau 39 : Analyse des correspondances de la table *substitutions* pour 12 activités économiques de canton de Genève et comparaison avec les résultats obtenus par l'utilisation d'ISIS et de Presteo.

Source : auteur.

Flux concerné	Détecté	Type de cause si non détecté	Analyse et commentaires en fonction des critères définis à la Section 3.3.2.3
Bois			
Palettes en bois	Oui		Plus de 10 synergies détectées
Déchets de bois traité/souillé	Non	Substitution de matériau	Substitution impossible du bois naturel et inadéquation technique pour la valorisation énergétique
Cendres de bois non-traité	Non	Substitution de matériau	Substitution de la matière fondante pour la production de céramique non détectée
Déchets de bois	Non	Flux absent	Pas de bois de coffrage mentionné dans les flux entrants des entreprises dans le secteur de la construction.
Autres sorties de bois	Oui		Substitution détectée pour la valorisation énergétique
Cellulose			
Cartons issus du conditionnement	Oui		Substitution détectée mais soumise à contrainte technique
Eaux			
Réutilisation des eaux de refroidissement	Partielle	Nomenclature	Les flux d'eau sortant comme <i>eau adoucie</i> ou <i>eau industrielle</i> ne correspondent pas à l' <i>eau potable</i> indiquée en entrée de circuit de refroidissement alors qu'une eau de moindre qualité serait envisageable. Plusieurs substitutions ont néanmoins été retenues pour un flux d'eau de refroidissement de qualité potable, comme utilisation pour le rinçage d'installations, la dilution de produits chimiques, le nettoyage des sols, la fabrication du béton.
Réutilisation des eaux traitées	Partielle	Nomenclature	Pas de détection de l' <i>eau épurée</i> en remplacement d' <i>eau non épurée</i> . Difficulté d'évaluation de la qualité.
Encre et pigments			
Réutilisation de pigments	Non	Nomenclature	Variabilité des noms de pigments et des niveaux de détail (exemple: sortie de <i>peinture</i> , alors qu'entrées d' <i>oxyde ferrique</i> , <i>chromique</i> , etc.).
Gaz			

Échanges d'hydrogène	Oui		Substitution
Échanges d'azote	Oui		Substitution pour le remplissage de transformateurs pendant leur transport, pour des traitements thermiques ou pour le traitement de surface.
Huiles et graisses			
Valorisation énergétique	Non	Substitution de matériau	Pas de correspondance entre les sorties d' <i>huile minérale & synthèse</i> et d' <i>huile de lubrification</i> et les entrées de <i>fioul</i> ou <i>fioul lourd</i> .
Matériaux inertes			
Sables de décantation	Oui		Substitution pour la fabrication de béton
Sables de fonderie	Oui		Substitution pour la fabrication de béton
Béton (gravat)	Non	Nomenclature	Pas de correspondance entre les sorties de <i>gravat</i> et les entrées de <i>granulat</i> .
Tuiles cassées	Non	Flux absent	Les granulats d'argile ne sont pas mentionnés comme matière première par les fabricants de béton.
Cendres volantes	Non	Nomenclature	Pas de correspondance entre une entrée de <i>cendre volante</i> et une sortie de <i>cendre végétale</i> .
Matières organiques			
Lactosérum	Non	Substitution de matériau	La valorisation énergétique du lactosérum n'est pas détectée si aucune activité de méthanisation n'est décrite.
Objets et substances fonctionnels			
Matériaux d'essuyage	Non	Flux absent	Aucune autre entrée de <i>chiffon coton</i> que celle de l'entreprise qui génère le flux de sortie.
Mousse synthétique	Oui		Échange réalisable en fonction des conditions techniques.
Plastiques et caoutchoucs			
Bigbags	Oui		Réutilisation pour le conditionnement des billes en polystyrène
Blanchets d'imprimerie	Non	Nomenclature	Pas de correspondance entre une sortie de <i>caoutchouc</i> et le composant équivalent dans le bitume décrit comme <i>polymère</i> . Absence de l'activité imprimerie parmi les entreprises étudiées.

Polystyrène de conditionnement ou film plastique	Oui		Substitution pour la réutilisation en conditionnement.
Produits chimiques			
Méthanol	Non	Flux absent	La station d'épuration considérée ne précise aucune utilisation de méthanol en flux entrant.
Acide nitrique	Oui		Deux sorties d'acide nitrique ont été identifiées alors que la STEP le mentionne en flux entrant. Cependant, les contraintes de qualité pourraient empêcher la réalisation de l'échange. La substitution pour une utilisation en bain de décapage a également été détectée.
Acide phosphorique	Non	Flux absent	La station d'épuration considérée ne précise aucun flux entrant d'acide phosphorique (ni d'autre nutriment phosphaté).
Acides (général)	Oui		Les entrées pour les bains de décapage acide sont l' <i>acide nitrique</i> et l' <i>acide fluorhydrique</i> . De l' <i>acide acétique</i> est également produit, mais aucune autre entreprise n'en utilise. Ainsi le degré de précision de la nomenclature est important pour ne pas passer à côté d'opportunités.
Hydruure de polyméthylsiloxane	Non	Flux absent	Le fabricant de tuiles considéré n'utilise aucun ignifuge actuellement pour ses tuiles, et si c'était le cas il est impossible qu'il utilise le même produit.
Alcools (général)			Une entreprise rejette plusieurs alcools dans un flux en mélange dont du méthanol, de l'alcool isopropylique et de l'éthanol qui correspondent à trois flux d'entrée dans trois entreprises différentes. Si les flux pouvaient être séparés, ces synergies seraient à étudier. Le mélange d'alcools pourrait aussi servir à une autre entreprise pour le nettoyage des instruments à condition de respecter certaines contraintes de qualité.
Vecteurs énergétiques			

Chaleur résiduelle	Partielle	Nomenclature	<p>Flux sortant d'eau à température élevée mais décrite comme <i>eau industrielle</i> ne correspondant pas à des entrées d'<i>eau chaude</i>. Pas de correspondance entre entrées d'<i>air chaud</i> et sorties d'<i>effluent gazeux</i>. Une synergie de <i>chaleur</i> a néanmoins été détectée. Les données collectées dans ce domaine manque de précision.</p> <p>Un échange d'air chaud a été détecté pour deux entreprises distantes de 100 mètres, ainsi qu'un échange de vapeur d'eau (distance de 300 mètres).</p>
Air comprimé	Non	Flux absent	<p>Sorties d'air comprimé pas mentionnées par les entreprises en utilisant.</p>

ANNEXE 4 :

Description des visites de terrains réalisées en Chine et aux Philippines

Entre 2006 et 2010, plusieurs voyages ont été effectués dans la région Asie-Pacifique pour visiter des projets, participer à des conférences et pour enseigner l'écologie industrielle. Je me suis d'abord rendu en 2006 à Séoul, en Corée, pour présenter les méthodologies de terrain développées en France et en Suisse lors de la 4th International Conference and Eco-Industrial Parks. La stratégie de développement des parcs éco-industriels coréenne, soutenue par le Korean National Cleaner Production Center (KNPC), était alors à ces débuts. En octobre 2006, je me suis rendu à Tianjin, dans la zone industrielle de TEDA, en Chine, pour assister à la 3rd International Conference on Circular Economy. En 2007, j'ai également pris part au 2nd China – Europa Forum, organisé par la Fondation Charles Léopold Mayer à Dunkerque, en France. Le thème principal de cette rencontre était le développement régional. Aux printemps 2008 et 2010, je me suis également rendu à l'Université de Tsinghua, à Péking, afin de donner un cours d'introduction à l'écologie industrielle dans le cadre du master franco-chinois de gestion de l'environnement organisé en partenariat avec l'école des Mines de Paris. Sous la direction du Professeur Shi Lei, j'ai également accompagné les étudiants lors de visites de zones industrielles dans la ville de Handan située dans la province de Hebei. Finalement, j'ai également passé six mois, de décembre à mai 2009, à l'Université de La Salle à Manille, pour écrire ce document et collaborer avec le Professeur Anthony S. F. Chiu.

La Chine

En Chine, la législation environnementale a énormément évolué depuis une trentaine d'années et la compréhension collective et les normes partagées sur les comportements économiques et organisationnels changent. Selon Zhang et al. (2007), les principes des lois environnementales sont les suivants :

1. Explorer, commander et contrôler les mesures dans leur ensemble
2. S'efforcer de lever des fonds pour la protection de l'environnement
3. Identifier les acteurs responsables et devant prendre en charge la protection de l'environnement
4. Encourager les actions conjointes de prévention, de contrôle et l'utilisation intégrée
5. Développer plus tôt les possibilités de coopération internationale

La législation chinoise est donc passée du statut d'embryonnaire à celui de stratégie de développement durable. La loi sur l'économie circulaire a été intégrée dans le 11^{ème} Plan quinquennal (2006 – 2010) au même niveau que la stratégie de développement économique. Elle prône un usage efficace des ressources non-renouvelables, une exploitation durable des ressources renouvelables, l'application des

principes de la production plus propre, la consommation durable, la valorisation des déchets comme ressources et le traitement des déchets sans nuisances. Ces six principes doivent permettre une augmentation de 25% du PIB par tonne de ressources consommée.

En regardant plus attentivement quelles sont les mesures prises pour limiter les impacts sur l'environnement dans la législation chinoise, on remarque que dans le secteur de la production de coke, par exemple, des mesures sont prises pour nettoyer, renforcer et réarranger les entreprises afin de réguler les émissions polluantes. La législation encourage la création de grandes installations plus efficaces au détriment de petites chaînes de production moins rentables. Cette mesure est soutenue par la loi sur l'eau et la pollution de l'air (Act of Water and Air Pollution Control of the People's Republic of China). Cette loi contient également une mesure pour, d'ici quelques années, obliger la récupération du soufre émis par la combustion du charbon.

La législation nationale encourage donc de plus en plus les entreprises à repenser leurs procédés de production. Depuis 2008, le gouvernement chinois a alloué 400 milliards de yuans à l'industrie du secteur secondaire dont une large partie est destinée à financer des économies d'énergie. Si elle consomme plus de 10000 tonnes de charbon par an, une entreprise peut recevoir 200 yuans pour chaque tonne non brûlée pour une durée de trois ans. Dans la province de Handan, dix entreprises sont impliquées dans des projets de ce type. Depuis 2002, une loi promeut également la production plus propre (Cleaner Production Promoting Law). Elle vise à réduire la production de déchets et à promouvoir un usage efficace des matières premières par des mesures d'éco-efficacité. Elle demande de repenser et d'optimiser les procédés de production, ainsi que de travailler à l'échelle du parc industriel. Il s'agit d'une base incitant à la mise en œuvre de symbioses industrielles.

Ces dernières années en Chine, la symbiose industrielle du Guitang Group dans la région autonome chinoise de Guangxi Zhuang a fait l'objet de plusieurs publications académiques (Zhu et Côté 2004; Geng, Haight et al. 2007; Zhu, Lowe et al. 2007). La zone de développement économique de Tianjin (TEDA), dans la baie de Bohai, au nord de la Chine, est également bien documentée pour sa transformation en parc éco-industriel (Geng 2005; Geng et Jun 2006; Geng, Zhu et al. 2007; Shi, Chertow et al. 2010). Le Guitang Group et TEDA sont des exemples de parcs éco-industriels incluant des symbioses industrielles existant actuellement en Chine. Fang, Côté et Qin (2007) en ont identifié 13. Le chiffre est bien supérieur aujourd'hui, selon Geng, Zhuang et Côté (Geng, Zhang et al. 2009), il en existerait plus de 100, dont 26 ont été sélectionnés comme projets pilotes par la *State Environmental Protection Administration* (SETA). Mais les résultats réels de certains projets restent parfois difficiles à vérifier. C'est dans le but d'améliorer l'évaluation des projets en cours que la SETA a mis au point un standard pour l'évaluation des parcs éco-industriels (Geng, Zhang et al. 2009).

En 2008 et 2010, j'ai donné un enseignement dans le cadre d'un master franco-chinois regroupant l'école des Mines et l'Université de Tsinghua. Le cours, d'une durée de 3 jours, comprend une introduction générale aux concepts de l'écologie industrielle et des cours sur l'analyse des flux de matière et d'énergie, les symbioses industrielles et les parcs éco-industriels. Il est donné en partenariat avec le Professeur Shi

Lei qui dispense un enseignement sur la production plus propre. Les étudiants, français et chinois, effectuent ensuite des visites de terrain et sont évalués sur la base d'un rapport basé sur les visites réalisées et leur analyse de la situation. En 2008 et 2010, les visites se sont déroulées dans la province de Hebei. Leur objectif était de se rendre dans des zones industrielles et des entreprises situées dans les environs de la ville de Handan. La province de Hebei, à 450 km de Péking, est proche de la frontière de trois provinces : Shanxi, Shandong et Henan.

La partie urbaine de Handan a une population de 1,5 millions d'habitants, alors que la préfecture qui en abrite 9 millions sur une surface de 12000 kilomètres carrés, constitue un centre économique régional important. En 2009, le produit intérieur brut de la ville était de 21,5 milliards de yuans en 2009, avec une croissance annuelle de 11%. À l'ouest, les montagnes recèlent d'abondantes ressources minérales, alors qu'à l'est s'étendent des plaines fertiles. Actuellement la préfecture est un centre important en Chine pour la production d'acier, de fer, de charbon, de ciment et de produits chimiques. Le parc industriel de Handan, auparavant appelé New and Hi-Tech Development Park, est situé au sud-est de la ville. Créé en 1992 avec l'approbation du comité scientifique et technologique de la province de Hebei, la surface actuelle du parc est de 160 hectares.

Au cours de nos visites, nous avons visité des installations de production de coke, de fer, d'acier et de ciment. La production d'acier requiert de grande quantité de coke, un produit issu de la transformation du charbon. La Chine est actuellement le plus important producteur mondial de coke. En 2008, elle en a produit 327 millions de tonnes, soit environ 60% de la production mondiale. 85% de cette production est utilisée pour produire de l'acier, du fer et un grand nombre d'alliages métalliques. La province de Hebei produit plus de 12% du coke chinois. Les impacts environnementaux générés par cette activité sont nombreux : pollution des eaux, émissions de gaz toxiques, comme du benzopyrene et rejets de chaleur non exploités. Premièrement l'extraction du charbon n'est-elle pas réalisée de manière efficace. Son abondance en Chine fait qu'il est souvent extrait rapidement. De nombreuses mines sont abandonnées être déplacées quelques centaines de mètres plus loin, là où l'extraction est moins coûteuse. Il en résulte une importante pollution des sols et des problèmes fonciers. Une fois extrait, le charbon est acheminé vers des installations de transformation dont l'efficacité est variable. Les plus anciennes sont évidemment les moins efficaces, principalement à cause des émanations de benzène et de leur faible rendement énergétique. L'usine de production de coke que nous avons visitée a été construite en 2004. Elle produit 2,6 millions de tonnes de coke par année, avec une production jointe d'électricité de 39 MWh. Pour produire une tonne de coke, elle utilise 1,3 tonne de matière première. Un co-produit de goudron, issu de la cuisson du charbon, est raffiné et vendu à des industries chimiques.

Le coke est utilisé ensuite pour la production de fer et d'acier. L'entreprise Hansteel (également appelé Handan Iron and Steel Group) est une entreprise publique appartenant au group HBIS (Hebei Iron and Steel). Etablie à Handan depuis 1958, l'entreprise produit 9 millions de tonnes d'acier par an, destinées à différents usages allant de l'aéronautique à la construction. Elle vend également du coke. À l'exception de

l'entreprise Baoshan, située à Shanghai, Hansteel est la plus grande et la plus moderne installation de Chine.

Finalement, nous avons visité une cimenterie dont la production est de 3000 tonnes par jour. Deux nouvelles chaînes de transformation étaient en cours de construction lors de notre visite. La matière première est extraite à 5 kilomètres de l'usine. Elle est transportée par camion. Le charbon utilisé provient de la province de Shanxi, comme la majorité de celui utilisé dans cette région. Cependant, un projet en cours à l'Université de Tsinghua a pour objectif de substituer au charbon des déchets municipaux et des boues, afin de réduire la consommation de combustibles fossiles et les émissions qui en découlent.

Il est donc possible de conclure que de nombreuses actions basées sur les principes de la production plus propre et soutenues par l'Université de Tsinghua sont en cours dans cette préfecture. En effet, il semble que les entreprises aient besoins de montrer qu'elles s'investissent dans ce domaine pour obtenir leur autorisation de fonctionner. Cette mesure devrait avoir un impact fort ces prochaines années sur la motivation des acteurs économiques à investir pour améliorer l'efficacité de leurs installations. Néanmoins, les contrôles semblent manquer. En 2008, plusieurs entreprises du secteur de l'acier fonctionnaient sans autorisation gouvernementale dans la province de Handan.

Selon les autorités locales, le développement futur de la région va s'orienter vers des secteurs de la technologie destinés à l'exportation et respectueux de l'environnement. Un effort particulier va être réalisé pour développer les technologies de l'information, la biotechnologie, la médecine, les nouveaux matériaux, l'optique, la machinerie, l'électricité et l'environnement. L'objectif des pouvoirs publics est de promouvoir les entreprises dont le développement est rapide ainsi qu'une répartition géographique optimisée.

Les Philippines

Les Philippines ont également fait plusieurs tentatives pour développer des parcs éco-industriels. Il s'agit même d'une des premières expériences dans le contexte asiatique (Lowe 2001). Ces projets ont été menés sous l'égide du PNUE, de l'Université de Yale et de l'US-EPA, en collaboration avec le Département du commerce et de l'industrie des Philippines (Chiu et Yong 2004).

Le principal projet en cours à la fin des années 1990 était le projet PRIME. Il s'agit d'un acronyme pour *Private Sector Participation in Managing the Environment*. Il est issu d'un partenariat entre le PNUE et le Bureau des investissements du Département du commerce et de l'industrie des Philippines. Son objectif était de créer des échanges de co-produits, ainsi que des systèmes de valorisation des ressources. Le projet, initié en 1998, comprenait quatre modules : la création d'Agenda 21 pour les entreprises, l'écologie industrielle, les SME et l'introduction des considérations environnementales dans l'esprit d'entreprise. Initialement prévu dans une seule zone, il a été étendu à cinq parcs industriels situés dans des provinces du sud de la capitale, Laguna et Batangas : Laguna International Industrial Park (Binan, Laguna), Light Industry Science Park (Cabuyao, Laguna), Laguna Technopark (Sta. Rosa, Laguna), Carmelray Industrial Park (Canlubang, Laguna) et Lima Technology Center (Malvar, Batangas).

Les travaux menés dans le cadre d'ateliers de travail et de visites de site ont permis d'identifier des potentiels de réutilisation de co-produits spécifiques, des opportunités de transformation destinées à faciliter la réutilisation de certains déchets et la recherche de nouvelles activités sous la forme d'un incubateur. Le projet a également considéré les possibilités de réduction de la production des déchets à l'intérieur des entreprises. Finalement, une évaluation a été réalisée afin d'adapter ces considérations au contexte légal et de les intégrer dans les politiques publiques (Lowe 2001).

Ce projet est l'une des premières expériences montrant la capacité de pays émergents à s'engager dans un développement éco-industriel en créant des partenariats public/privé. Des exemples d'échanges de co-produit détectés ou mis en œuvre sur ces zones sont détaillés dans le document référence du développement des parcs éco-industriels en Asie (Lowe 2001). Depuis le début des années 2000 cependant, le projet ne semble pas avoir connu de nouveaux développements spectaculaires. Les pages internet n'ont pas été mises à jour ou ne sont plus disponibles⁶⁵.

En 2007, David Fonjallaz, alors étudiant à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne, a effectué un stage à l'Université de La Salle (DLSU) à Manille, en collaboration avec l'Université de Lausanne. Des données de flux de matière provenant d'un parc industriel ont été mises à disposition sous réserve de confidentialité par les autorités des zones économiques Philippines (PEZA) afin de permettre de réaliser une détection de symbioses industrielles. Les données ont été récoltées par des employés de PEZA en 2005 dans diverses entreprises du parc industriel de Mactan proche de la ville de Cebu City dans le contexte d'une étude préliminaire en vue d'un projet de développement éco-industriel. Le projet qui avait officiellement débuté en octobre 2006, est le résultat d'une collaboration entre PEZA et la Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ). L'Université de Lausanne a mis à disposition une version du logiciel de détection de symbioses industrielles Presteo. Les données récoltées ne se sont néanmoins pas révélées assez précises pour permettre d'énoncer des résultats robustes et prometteurs (Fonjallaz et Suquet 2007). Ce travail a mis en évidence l'inutilité de disposer d'un outil de détection exhaustive de symbioses industrielles lorsque l'accès aux données n'est pas assuré. L'année suivante, une autre étudiante de l'EPFL, Léda Gerber, a également travaillé sur le parc industriel de Mactan, cette fois pour évaluer et améliorer la gestion des déchets de cuisine (Gerber 2007).

Depuis lors, il ne semble pas que de nouvelles recherches aient été initiées dans le domaine des symbioses industrielles. Lors de mon séjour à l'Université de La Salle, au premier semestre 2009, il m'a par contre été donné de participer à une présentation d'un programme mis en place par l'entreprise Nestlé et destiné à aider ses sous-traitants à produire de manière plus efficace. Le projet, mené avec le soutien financier de la multinationale, rencontre un large succès auprès des entreprises philippines.

⁶⁵ <http://ieprime.tripod.com/home02.htm>

ANNEXE 5 :

Perspectives de recherches appliquées

L'Université de Lausanne a initié des recherches dans le domaine des symbioses industrielles depuis la création de l'Institut de politiques territoriales et d'environnement humain en 2005. Les travaux présentés dans les chapitres précédents ont fait à l'heure actuelle l'objet de plusieurs publications académiques auxquels j'ai participé en tant que co-auteur (Massard et Erkman 2009; Costa, Massard et al. 2010; Grant, Seager et al. 2010). D'autres devraient voir le jour au cours des prochains mois.

Ces recherches ont également permis de suivre des projets de terrain en Suisse romande. Il est possible d'affirmer que le concept et son potentiel d'application sont aujourd'hui bien compris des pouvoirs publics et des acteurs économiques dans la plupart des cantons romands.

Ces expériences de recherche et d'application permettent d'énoncer un certain nombre de recommandations pour poursuivre les travaux dans ce domaine. Cette section synthétise les propositions faites à la fin des chapitres 2, 3 et 4 et propose également des recherches destinées à faciliter la diffusion des expériences réussies en suisses à l'extérieur du territoire national et en particulier en Asie.

Approfondir les connaissances techniques, légales, économiques et environnementales sur les symbioses environnementales

Nous avons à plusieurs reprises insisté sur la nécessité de proposer des symbioses industrielles représentant des solutions représentant un optimal environnemental. Suite aux réflexions proposées dans le Chapitre 4, il reste encore beaucoup de travail à réaliser pour identifier et caractériser certaines filières de valorisation d'un co-produit permettant de minimiser les impacts sur l'environnement et de maximiser la marge bénéficiaire des entreprises. Cette tâche doit être menée par des experts compétants dans les différentes familles de flux considérés, en recourant à l'analyse de cycle de vie pour comparer les scénarios de valorisation et les technologies utilisées. Pour cela, des collaborations avec des instituts de recherche en science de l'ingénieur doivent être développées. Le Laboratoire d'énergétique industrielle (LENI), à l'EPFL, a initié des recherches dans ce sens depuis peu. Une collaboration avec l'IPTEH, qui bénéficie d'une expérience de terrain importante, mais ne possède pas toutes les compétences techniques pourrait être intéressante.

Parallèlement, les équations économiques présentées dans la Section 2.4.3, traitant de l'évaluation économique des symbioses industrielles, doivent être affinées et faire l'objet d'applications pratiques. Elles doivent être adaptées à différents cas de figure et modes de fonctionnement de l'industrie pour prendre en compte de manière plus pointue les contraintes financières des entreprises. La poursuite des travaux dans ce domaine permettra de mieux conseiller et accompagner dans le changement les entreprises

désireuses de s'engager dans une symbiose industrielle. Les études de cas ont démontré que même lorsqu'une option paraît pertinente, il est bénéfique de suivre l'entreprise tout au long de la procédure de mise en œuvre.

Améliorer la compréhension du contexte social et politique

Ce travail a également mis en évidence notre manque de connaissance du fonctionnement interne des entités économiques. Pour accompagner une entreprise dans une démarche de symbioses industrielles de manière efficace, il est nécessaire de maîtriser les enjeux organisationnels et managériaux liés à la prise de décision. En complément du modèle économique proposé dans ce travail, il semblerait pertinent de développer un modèle des enjeux et impacts organisationnels d'une synergie à l'intérieur des limites des entités juridiques. Une approche des symbioses industrielles adaptée aux mécanismes cognitifs, culturels et structurels suisses par la théorie de la gestion de projet et de l'apprentissage organisationnel serait pertinente.

Il serait également intéressant d'étudier plus précisément dans quels domaines le concept de symbioses industrielles peut être renforcé par les politiques publiques, déjà fortement structurantes en Suisse, en étant attentif aux atteintes possibles à la liberté de commerce et au marché libre du recyclage des déchets d'entreprise. Il est également intéressant de discuter à quelle échelle institutionnelle des mesures incitatives peuvent être énoncées : les communes, les cantons ou la Confédération.

L'aménagement du territoire et la promotion économique ont un rôle évident à jouer pour apporter des éléments de réponse concrets à ces préoccupations et créer réellement un développement éco-industriel. Ces recherches pourraient déboucher sur des recommandations pour mieux intégrer l'écologie industrielle dans les politiques publiques de développement régional, comme la nouvelle politique régionale détaillée dans la Section 5.3, en rapprochant l'environnement des préoccupations économiques et liées à l'aménagement du territoire. En d'autres termes, il s'agit d'étudier comment ajouter la dimension des flux de matière et d'énergie lors des phases d'implantation d'une nouvelle activité (remaniement parcellaire ou projets de reclassement de zones) et dans la promotion économique du territoire, mais tout en maîtrisant la consommation de ressources engendrée. Pour cela, il est nécessaire d'élaborer de nouvelles procédures intégrant les connaissances et les processus décisionnels existants pour favoriser ce nouveau type de dialogue et de collaboration entre acteurs du territoire.

Symbioses industrielles, systèmes d'information géographique et aménagement du territoire

Les symbioses industrielles apparaissent dans ce travail comme un nouvel argument à prendre en compte lors de la localisation des zones industrielles et des entités économiques désireuses de s'y installer. La Section 3.4, qui détaille les développements possibles de SymbioGIS, propose un grand nombre de pistes de recherche pour développer ses fonctionnalités et optimiser la détection du potentiel d'optimisation de la gestion des ressources sur un territoire. Dans son stade de développement actuel, le programme possède

uniquement la base de données sur les flux de matière et d'énergie et l'interface destinée au grand public. Les fonctionnalités F 1 à F 10 ont fait l'objet de recherches. Il conviendrait de continuer à travailler sur :

- L'importation et l'exportation des données (F 1 et F 2, Section 0)
- L'optimisation de la détection de symbioses industrielles (F 3 et F 4, Section 3.3.2)
- La représentation visuelle des symbioses industrielles (F 6 et F 10, Section 3.3.3)
- La gestion des entreprises, l'identification des puits et sources et création de zones tampons (F 6, F 7 et F 10, Section 3.3.4)
- Les fonctionnalités pour la gestion de projets (F 9, Section 3.3.5)

La publication réalisée en collaboration avec Gabriel Grant, de l'Université de Yale (Grant, Seager et al. 2010) pose les bases d'une comparaison des outils informatiques développés et utilisés pour des projets de symbioses industrielles. Afin de mieux comprendre l'utilisation qui est faite de ces outils de par le monde, il serait intéressant de comparer certains outils développés pour le stockage de données et l'aide à la décision dans le cadre de projets de symbioses industrielles. Les critères de comparaison devraient inclure la palette des fonctionnalités proposées et la précision des résultats obtenus. Une recherche proposant un jeu de données similaires à tous les programmes afin de comparer les résultats obtenus permettrait de créer de nouvelles collaborations et d'avancer plus vite vers un outil performant.

Dans le cas de la Suisse, une analyse plus approfondie des sources de données disponibles sur la consommation des entreprises serait également pertinente afin d'alimenter plus facilement SymbioGIS. Il serait intéressant de disposer de métadonnées par secteur d'activité. A titre d'exemple, la Confédération a mis en ligne en février 2009 un registre des polluants pour plus de 200 entreprises situées dans toute la Suisse⁶⁶. Il serait intéressant d'étudier les informations du registre afin de déterminer si elles peuvent constituer une base pour la détection de symbioses industrielles.

Sur la base d'une interface cartographique comme celle proposée par SymbioGIS, il pourrait être pertinent de développer une liste des proximités entre activités intéressantes pour favoriser un développement éco-industriel. Cette recherche pourrait être développée en se basant sur des travaux réalisés en Espagne (Fernández et Ruiz 2009). Les solutions proposées devront étudier la grande liberté dont bénéficient les acteurs économiques en termes de choix d'implantation et de proposer les solutions adaptées.

Finalement, il est maintenant nécessaire d'expérimenter l'utilisation de SymbioGIS sur de nouveaux territoires afin d'analyser sa réelle utilité pour la planification des activités économiques. L'architecture de la base de données est actuellement conçue pour le traitement de l'information en provenance d'une entreprise ou d'un site de production. Or, cette approche pourrait être étendue à la gestion de bâtiments et de parcelles. Il s'agit également d'une piste de recherche pour l'avenir.

⁶⁶ <http://www.bafu.admin.ch/chemikalien/prtr/index.html?lang=fr>

Création d'une nomenclature internationale des flux de matière et d'énergie adaptée aux besoins de l'industrie

Les principaux points faibles identifiés pour la détection de symbioses industrielles ne sont pas liés au développement technique de la fonctionnalité de détection, mais à la faiblesse de la nomenclature utilisée pour décrire les flux et les composants. Son influence sur la pertinence des résultats est cruciale. La Section 3.5, qui détaille le potentiel de SymbioGIS pour la planification territoriale suggère de travailler de manière beaucoup plus approfondie sur la nomenclature utilisée pour la détection des symbioses industrielles mais également pour l'ensemble des analyses de flux de matière et d'énergie.

Un paramètre important de la future nomenclature consistera en son adaptabilité à différents secteurs d'activité, langues et pays.

Développement d'un système d'indicateurs de faisabilité et de pertinence adapté aux symbioses industrielles

Sur la base des éléments présentés dans le Chapitre 4 et dans l'Annexe 2. Il serait nécessaire de poursuivre le travail de développement d'indicateurs de faisabilité et de pertinence pour la mise en œuvre de symbioses industrielles.

Afin de ne pas mener cette réflexion de manière isolée ces recherches devront tenir compte des systèmes d'indicateur de référence utilisés en Suisse et en Europe : le système d'indicateurs du développement durable Suisse MONET et le système européen d'analyse de la performance économique EUROSTAT.

Création de partenariats avec les organismes actifs dans la région Asie-Pacifique

La Section 5.5.1 détaille les possibilités de transposition dans le contexte asiatique. En particulier, les procédures développées dans le contexte suisse pourraient apporter des solutions sous la forme d'outils participatifs pour aider à établir des liens de confiance entre acteurs économiques et institutionnels. Un coordinateur de projet, expert des symbioses industrielles et possédant une connaissance adéquate du contexte national dans lequel il se trouve (soit de par sa formation, soit en collaborant avec des experts locaux), peut créer une dynamique d'équipe, animer des réseaux sociaux d'acteurs économiques et créer un contexte favorable pour la mise en place de symbioses industrielles. Pour faciliter l'essor de projets dans cette partie du monde, il serait intéressant d'étudier les possibilités de partenariat avec des organismes de recherche des pays concernés, en particulier la Chine, la Corée, le Japon, l'Inde et les Philippines et d'approfondir le transfert de connaissance.

Evaluation du potentiel des symbioses industrielles pour une diminution absolue de la consommation de ressource à l'échelle mondiale

Il est difficile d'évaluer sur la base de la littérature académique et des recherches présentées dans cette thèse la contribution possible des symbioses industrielles à une diminution absolue de la consommation de ressources. Il serait intéressant de disposer d'une évaluation de l'importance des économies de

ressources, relatives ou absolues, qui pourrait engendrer les symbioses industrielles et un développement industriel de grande envergure. Cette recherche pourrait être initiée en rapprochant les connaissances des grands cycles de matières élaborés grâce aux analyses de flux de matière et d'énergie à l'échelle internationale, du potentiel des symbioses industrielles pour les secteurs d'activité qui réalisent leur extraction et leur transformation.

