

Rapport 140, 2023

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:35310



+4 °C et plus: les paysages suisses face au changement climatique

Silvia Tobias
Elena G. Siegrist
Luca Bütikofer
Matthias Bürgi
Karina Liechti
Emmanuel Reynard
Antoine Guisan
Davnah Urbach
Christophe Randin



Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL
CH-8903 Birmensdorf

Rapport 140, 2023

WSL Berichte

doi.org/10.55419/wsl:35310

+4 °C et plus: les paysages suisses face au changement climatique

Silvia Tobias
Elena G. Siegrist
Luca Bütikofer
Matthias Bürgi
Karina Liechti
Emmanuel Reynard
Antoine Guisan
Davnah Urbach
Christophe Randin

Mentions légales

Éditeur: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Responsable de ce cahier: Matthias Bürgi, directeur de l'unité de recherche Dynamique du paysage WSL

Direction de la rédaction: Sandra Gurzeler, responsable de l'équipe Publications, WSL

Mandant: Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Biodiversité et paysage, CH-3003 Berne

L'OFEV est un office du Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC).

Mandataire: Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL

Auteurs/trices:

Silvia Tobias, Centre de recherche sur le paysage, WSL

Elena G. Siegrist, Unité de recherche Dynamique du paysage, WSL

Luca Bütikofer, Centre alpin de phytogéographie (CAP) et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Matthias Bürgi, Unité de recherche Dynamique du paysage, WSL

Karina Liechti, Fondation suisse pour la protection et l'aménagement du paysage

Emmanuel Reynard, Institut de géographie et durabilité (IGD) et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Antoine Guisan, Département d'écologie et évolution (DEE), Institut des dynamiques de la surface terrestre (IDYST) et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Davnah Urbach, Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA), Université de Berne, et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Christophe Randin, Centre alpin de phytogéographie (CAP), Fondation Jean-Marcel Aubert, Champex-Lac et Centre interdisciplinaire de recherche sur la montagne (CIRM), Université de Lausanne

Accompagnement OFEV: Johann Dupuis, Matthias StremLOW, Gilles Rudaz, Guirec Gicquel

Remarque: cette étude a été rédigée sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV). Le mandataire est seul responsable de son contenu.

Mise en page: Jacqueline Annen

Proposition de citation

Tobias S., Siegrist E., Bütikofer, L., Bürgi M., Liechti K., Reynard E., Guisan A., Urbach D., Randin C. (2023) +4°C et plus: les paysages suisses face au changement climatique. WSL Ber. 140. 53 p. doi.org/10.55419/wsl:35310, Téléchargement PDF: www.wsl.ch/berichte

ISSN 2296-3448 (imprimé)

ISSN 2296-3456 (en ligne)

Crédit photo couverture:

Etat actuel des glaciers du Mont Blanc de Cheilon et du Pigne d'Arolla au-dessus du barrage de la Grande Dixence, Val d'Hérémence (VS). Recul des glaciers modélisé dans le cas de réchauffement climatique progressif jusqu'à +4°C © Luca Bütikofer, UNIL; Paysage actuel dans le Seeland, paysage dans le Seeland à +4°C selon une stratégie réactive ou proactive d'adaptation au changement climatique © Ikonaut GmbH.

Recherche pour l'homme et l'environnement: l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage WSL surveille et étudie la forêt, le paysage, la biodiversité, les dangers naturels ainsi que la neige et la glace. C'est un institut de recherche de la Confédération et il fait partie du domaine des EPF. Le WSL Institut pour l'étude de la neige et des avalanches SLF fait partie du WSL depuis 1989.



Cette publication est en accès libre et tous les textes et photos, sauf mention contraire, sont soumis à la licence Creative Commons CC BY 4.0. Ils peuvent être librement reproduits, diffusés et modifiés à condition d'en mentionner la source.

Table des matières

1	Résumé	5
2	Introduction	7
2.1	Contexte	7
2.2	Objectifs du projet	7
2.3	Sélection des études de cas	8
2.4	Choix des scénarios climatiques	8
3	Approche méthodologique	11
3.1	Aperçu de la procédure	11
3.2	Développement de scénarios qualitatifs	11
3.2.1	Modèle systémique conceptuel	12
3.2.2	Récits sur les paysages suisses avec +4°C de réchauffement	14
3.3	Modélisations quantitatives	16
3.3.1	Modèle de prédiction de l'utilisation du sol	17
3.3.2	Modèle d'allocation des classes d'utilisation du sol	17
3.3.3	Modèle de prédiction des communautés végétales	19
3.3.4	Évaluations et indicateurs spécifiques	19
3.4	Visualisations	20
4	Résultats: les principales modifications du paysage en Suisse en réponse au changement climatique	21
4.1	Modifications du paysage à grande échelle dans toute la Suisse	21
4.2	Modifications du paysage dans les régions de montagne	22
4.2.1	Des sommets gris et verts à la place des sommets blancs	22
4.2.2	L'agriculture de montagne, un secteur qui façonne le paysage	25
4.3	Modifications du paysage dans le Moyen Pays	27
4.3.1	Chaleur et sécheresse marquent le paysage	27
4.3.2	Cours d'eau: du ruissellement aux crues soudaines	28
5	Des récits sur les paysages face au changement climatique	29
5.1	Une randonnée dans le Seeland en 2085	29
5.1.1	Une zone d'habitat dense	31
5.1.2	Le paysage agricole	31
5.1.3	Le paysage fluvial	34
5.1.4	Une commune rurale centrale	35
5.1.5	Une zone humide	37
5.1.6	La forêt	37
5.1.7	Près de la tour d'observation	38
5.2	Une randonnée dans l'Entremont en 2085	39
5.2.1	Un village de montagne	40
5.2.2	Une rivière	41
5.2.3	Un torrent	41
5.2.4	La forêt	42
5.2.5	En téléphérique jusqu'à un point de vue	45
5.2.6	Un lac dans une ancienne région glaciaire	45
5.2.7	L'agriculture de montagne	46
5.2.8	Une vue sur une grande station touristique	48
6	Discussion et conclusion	49
7	Références	51

Lien vers les vidéos: <https://www.doi.org/10.16904/envidat.451>

Lien vers les photos panoramiques: <https://viergrad.envidat.ch/>



1 Résumé

Le paysage, dans sa diversité, est une ressource importante pour la Suisse et influence fortement la qualité de vie de l'être humain. Pourtant, les modifications possibles des paysages dues au changement climatique, et par conséquent les impacts sur l'humain, n'ont guère été abordées jusqu'à présent. Ce projet a développé et représenté différents scénarios sur la manière dont le changement climatique pourrait affecter le paysage. Son objectif était de sensibiliser la société aux effets du changement climatique sur le paysage. La démarche assume un réchauffement climatique relativement important qui représente des risques élevés pour l'homme et l'environnement. Le scénario choisi prévoit une augmentation moyenne de la température d'environ 4°C par rapport à la température moyenne entre 1981 et 2010. Il représente donc des situations dans lesquelles les objectifs de l'accord de Paris sur le climat de 2015 ne sont pas atteints.

Une recherche bibliographique ainsi que des interviews d'experts nous ont permis d'élaborer un modèle d'impact qualitatif sur la base duquel nous avons déduit des scénarios d'évolution du paysage sous des conditions climatiques beaucoup plus chaudes. D'autre part, nous avons modélisé les changements du potentiel d'utilisation du sol et de la composition des espèces des communautés végétales à l'aide de méthodes quantitatives.

L'accent a été mis sur deux exemples de paysages suisses typiques, une région de montagne et l'autre dans le Moyen Pays. Nous avons choisi la région de l'Entremont (VS) pour représenter les Alpes suisses et le Seeland bernois (BE) pour le Moyen Pays. La modélisation a été effectuée en grande partie pour l'ensemble de la Suisse. Des considérations détaillées ont toutefois été faites pour deux des régions d'étude.

Les scénarios climatiques actuels pour la Suisse (CH2018) du National Centre for Climate Services (NCCS) ont servi de base aux scénarios paysagers. Afin d'attirer l'attention sur les risques liés au changement climatique, nous avons choisi le scénario RCP8.5, selon lequel un réchauffement général de 4°C par rapport à la période 1981–2010 est possible. Nous avons considéré deux stratégies différentes d'adaptation au changement climatique: une planification des mesures purement réactive et à court terme et une planification des mesures proactive qui anticipe des impacts du réchauffement.

Les modèles d'impact développés dans le cadre du projet ont révélé que les paysages suisses subiront des changements considérables en raison du changement climatique. Dans les régions de montagne, la disparition des glaciers ainsi que l'élévation de la limite des arbres et de la végétation constitueront les changements les plus marquants du paysage. En raison de la modification des conditions de végétation climatiques, la composition des espèces dans les forêts changera partout. Dans le Moyen Pays, les hêtres et les conifères ne trouveront plus de bonnes conditions de vie en raison de la sécheresse et migreront donc vers des altitudes plus élevées. Dans les forêts du Moyen Pays, des espèces de feuillus devraient être favorisées comme futures essences principales. Si des conifères facilement inflammables (p. ex. des pins) s'installent à des altitudes plus élevées, le risque d'incendies de forêt pourrait augmenter dans le Jura et dans les Alpes.

D'une manière générale, la situation en matière de risques naturels va évoluer. Dans les régions de montagne, il faut s'attendre à davantage de glissements de terrain et d'éboulements, mais à moins d'avalanches, tandis que dans le Moyen Pays, les crues menaceront plus souvent les zones habitées, les infrastructures et les terres agricoles. L'influence des dangers naturels sur le paysage dépendra des stratégies choisies pour se protéger contre ces menaces. Des murs de soutènement massifs et de hautes digues créent un paysage différent des pentes avec des forêts de protection et des élargissements de cours d'eau, ces derniers occupant des surfaces plus importantes.

L'aspect futur des zones d'habitation et des terres agricoles dépendra également beaucoup de la manière dont les politiques publiques et la société s'adapteront au changement climatique. Les habitations pourront être parsemées d'espaces verts et de plans d'eau ouverts afin d'atténuer la chaleur ou, au contraire, on mettra sur des espaces intérieurs rafraîchis, reconnaissables aux climatiseurs installés sur les bâtiments. Dans le cas des terres agricoles, les stratégies d'adaptation au changement climatique seront déterminantes pour l'aspect futur du paysage. Le développement de cultures

résistantes à la sécheresse, des systèmes d'irrigation étendus et de vastes installations de serres pour les cultures auront un impact considérable sur le paysage.

Nombre de ces mesures d'adaptation au changement climatique ayant un impact sur le paysage doivent être planifiées et mises en œuvre suffisamment tôt pour faire preuve d'efficacité dans un climat modifié. Il s'agit notamment des mesures d'adaptation des forêts au changement climatique, du réaménagement des agglomérations et des mesures de protection contre les dangers naturels. Nous devrions donc nous pencher dès aujourd'hui sur l'adaptation aux changements climatiques. Il convient toutefois de noter que ce projet se base sur l'hypothèse que les émissions de gaz à effet de serre continueront d'augmenter. Les mesures visant à atténuer le changement climatique et leurs effets sur le paysage n'ont pas été prises en compte, mais elles sont tout aussi importantes que les mesures d'adaptation.

Afin de répondre à l'exigence de sensibilisation aux conséquences du changement climatique, les scénarios ont été rédigés sous forme de récits. Ceux-ci décrivent des promenades à travers des paysages d'été dans les régions de montagne et dans le Moyen Pays dans un avenir beaucoup plus chaud. En outre, nous avons accordé une grande importance à la visualisation des paysages futurs possibles. Outre différentes cartes résultant de la modélisation quantitative, des images panoramiques interactives à 360° ont été créées pour les deux paysages choisis. Elles montrent une vue panoramique des états futurs possibles du paysage, si une stratégie réactive ou proactive d'adaptation au changement climatique est choisie. Certains détails sont expliqués dans des fenêtres d'information qui s'ouvrent lorsque l'on clique dessus. Afin d'attirer l'attention sur les images panoramiques interactives et sur ce rapport, deux courtes vidéos ont également été réalisées, l'une pour le Moyen Pays et l'autre pour les régions de montagne.

Le rapport s'adresse aux spécialistes de la thématique du paysage et au grand public. Le chapitre 2 explique le contexte et les objectifs du rapport, le chapitre 3 détaille les méthodes utilisées pour les modélisations quantitatives et qualitatives ainsi que pour le développement des récits et des visualisations. Le chapitre 4 résume les principaux résultats pour la Suisse et les régions d'étude. Le chapitre 5 présente les récits des régions d'étude avec des illustrations tirées des images panoramiques. Le rapport se termine par une discussion des résultats au chapitre 6. Les visualisations (cartes, images panoramiques, animations) sont disponibles sous forme de produits numériques séparés.

2 Introduction

2.1 Contexte

Aujourd'hui déjà, le changement climatique se fait sentir dans différentes régions du monde, dont la Suisse, avec des vagues de chaleur, des sécheresses ou des inondations. Les scénarios climatiques spécifiques à la Suisse (CH2018) prévoient d'importantes modifications du régime des températures et des précipitations, dont les répercussions se feront sentir sur l'humain, les écosystèmes naturels, l'agriculture et la sylviculture, la situation des dangers naturels et, enfin, sur le paysage (NCCS 2018). Dans l'ensemble, il est justifié de s'attendre à ce que le changement climatique entraîne plus de risques que d'opportunités pour la Suisse (Köllner *et al.* 2017). Alors que dans certaines régions, les conditions pour l'agriculture ou le tourisme estival pourraient s'améliorer, il est à prévoir que dans de vastes régions de Suisse, humains et environnement subissent les inconvénients liés à une plus grande exposition à la chaleur, aux sécheresses, à l'augmentation des crues, à l'augmentation des dangers naturels ainsi qu'au déplacement des espèces et à l'augmentation des espèces nuisibles. La stratégie d'adaptation aux changements climatiques du Conseil fédéral exige donc des mesures coordonnées des différentes politiques sectorielles afin d'exploiter au maximum les opportunités offertes par les changements climatiques et de minimiser les risques (Confédération suisse 2020).

Une conséquence supplémentaire du changement climatique est la modification profonde des paysages. La diversité des paysages est une ressource importante de la Suisse, qui contribue à la qualité de vie et à l'attractivité du cadre de vie, et qui constitue une base économique entre autres pour le tourisme. Des modifications importantes des paysages typiques d'un lieu en raison du changement climatique peuvent avoir des conséquences sociétales et économiques indésirables, car elles portent atteinte à des prestations paysagères importantes telles que l'esthétique, l'identité ou la détente (Keller et Backhaus 2020; Keller *et al.* 2019). Malgré l'importance des paysages pour la Suisse, leurs éventuelles modifications dans le contexte du changement climatique n'ont jusqu'à présent fait l'objet que d'études scientifiques isolées (p.ex. Buttler *et al.* 2012).

L'évolution du paysage ne sera pas seulement une conséquence naturelle du changement climatique, mais dépendra aussi fortement du comportement de l'être humain. Les paysages seront en fonction de si la société et les politiques publiques prennent dès aujourd'hui des mesures préventives ou si rien n'est fait pendant longtemps pour s'adapter au changement climatique. Dans le domaine scientifique, les scénarios servent à décrire des situations futures possibles, tout en mettant en exergue les incertitudes. Des systèmes d'indicateurs permettent quant à eux de mesurer certains changements.

Toutefois, de tels résultats scientifiques ne contribuent que de manière limitée à convaincre le public de la problématique du changement climatique et de la nécessité d'agir (Morris *et al.* 2019). Il manque ainsi des bases permettant de sensibiliser le grand public aux modifications des paysages suisses dues au changement climatique. Pour sensibiliser à une menace abstraite comme le changement climatique, qui s'applique à de grandes échelles spatio-temporelles, les récits peuvent être intéressants (Harris 2020; Moezzi *et al.* 2017). Au-delà de la narration d'histoires, les visualisations, en particulier les images de changements possibles du paysage, peuvent également susciter des réactions émotionnelles et constituent donc des outils de sensibilisation appropriés (Nicholson-Cole 2005; Vervoort et Kok 2010).

2.2 Objectifs du projet

L'objectif principal du projet était de contribuer à la sensibiliser au changement climatique et à ses effets sur les paysages en Suisse à travers des produits s'adressant aux professionnels du paysage sur le terrain et au grand public. L'équipe du projet a donc développé et produit des visuels de scénarios montrant les effets du changement climatique sur le paysage et destinés à inciter à la réflexion. C'est pourquoi nous avons fait l'hypothèse d'un réchauffement climatique élevé, c'est-à-dire d'une augmentation des

températures de 4°C par rapport aux températures moyennes de la période comprise entre 1981 et 2010 (cf. chap. 2.4). Le scénario envisagé pour ce projet décrit donc des états du paysage qui pourraient se produire si les objectifs de l'accord de Paris sur le climat de 2015 n'étaient pas atteints.

Les trois objectifs spécifiques du projet étaient:

1. l'étude des chaînes d'impacts entre le changement climatique, les actions des acteurs et les modifications du paysage;
2. la modélisation des changements du potentiel d'utilisation du sol et des communautés végétales dans des conditions climatiques modifiées;
3. la description claire et la présentation des scénarios sous forme de récits et d'images.

Nous avons travaillé avec des études de cas afin que les récits et les images aient un contenu concret.

2.3 Sélection des études de cas

Afin de pouvoir obtenir des représentations aussi concrètes que possible et en tenant compte de la consigne d'étudier des paysages auxquels la plus grande partie possible de la population suisse peut s'identifier sur la base de la vie quotidienne ou des loisirs, deux espaces paysagers typiques de la Suisse ont été choisis: une région de montagne et une région du Moyen Pays. Pour l'étude de cas en région de montagne, nous avons choisi le district d'Entremont dans le canton du Valais. On y trouve différents paysages sur un gradient d'altitude de 3500 m, des centres régionaux et des surfaces agricoles intensives dans le fond de la vallée et des paysages largement naturels en haute montagne, en passant par des infrastructures touristiques à moyenne altitude.

Pour l'étude de cas du Moyen Pays suisse, nous avons choisi un paysage périurbain, c'est-à-dire un paysage situé en dehors des agglomérations et composé de villages et de petites villes. Ces zones périurbaines sont des lieux d'habitation et de détente pour une partie considérable de la population suisse. Les modifications de ces paysages dues au changement climatique affecteront donc de nombreuses personnes. Le Seeland bernois a été choisi comme exemple de région pour les scénarios et les modélisations. Les visualisations dans les images panoramiques sont également inspirées du Seeland. Toutefois, il ne s'agit pas d'un paysage réel, mais d'un paysage exemplaire créé à partir de différentes photographies. De cette manière, les éléments importants du paysage de la région du Seeland ont pu être représentés sur une seule image.

2.4 Choix des scénarios climatiques

Pour estimer l'ampleur future du changement climatique, les scientifiques utilisent des scénarios représentant différentes trajectoires de concentration en gaz à effet de serre. Ces trajectoires sont représentatives de différents choix de sociétés («Representative Concentration Pathways», RCP: van Vuuren *et al.* 2011). Celles-ci se basent principalement sur des hypothèses concernant les futures émissions de gaz à effet de serre et prédisent, selon le scénario, une modification du bilan énergétique de la Terre à sa surface de 2 à près de 9 W/m². Depuis le cinquième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (IPCC 2013), les RCP sont utilisées comme base pour des scénarios climatiques mondiaux ou régionaux. Les scénarios climatiques spécifiques pour la Suisse sont également développés sur la base de ces trajectoires et permettent de faire des prévisions par région (NCCS, 2018).

Dans ce projet, nous nous sommes basés sur les scénarios climatiques CH2018 du NCCS (2018). Comme pour les scénarios du NCCS, nous avons choisi comme température de référence la température moyenne des années 1981 à 2010. Afin de pouvoir mettre en évidence le plus clairement possible les effets du changement climatique sur les paysages tout en présentant des scénarios réalistes, nous avons élaboré les scénarios conformément à la trajectoire de concentration RCP8.5 pour la période «fin du

XXI^e siècle», c'est-à-dire 2070–2099. Cette trajectoire de concentration part du principe que les émissions de gaz à effet de serre continueront à augmenter jusqu'à la fin du XXI^e siècle. Pour la Suisse, il peut en résulter une augmentation des températures moyennes de 3,3 à 5,4°C d'ici la fin du siècle par rapport à la période 1981–2010 (NCCS, 2022).

Les modélisations quantitatives et qualitatives se basent en outre sur deux stratégies différentes pour l'adaptation au changement climatique: i) une adaptation purement réactive (planification et mise en œuvre de mesures à court terme) et ii) une adaptation proactive (planification et mise en œuvre de mesures à long terme, par anticipation) (fig. 2.1). Nous avons choisi ces extrêmes afin de pouvoir représenter des scénarios nettement différents, bien qu'ils ne soient probablement pas mis en œuvre de cette manière dans la réalité. Nous n'avons pas pu prendre en compte les stratégies d'atténuation du changement climatique. L'éventail des mesures visant à atténuer le réchauffement climatique est très large (de la renonciation partielle à la mobilité à l'installation généralisée de centrales solaires et éoliennes) et les effets sur le paysage peuvent être très variables.

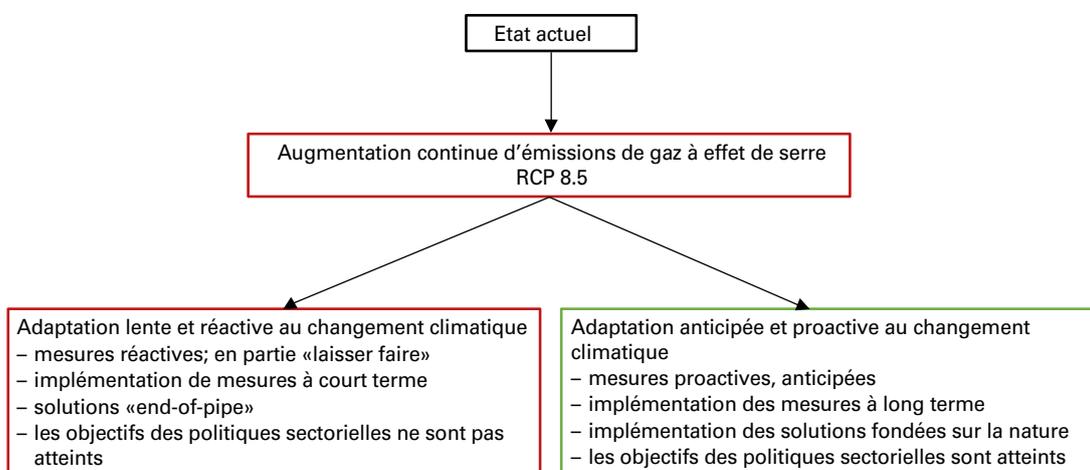


Fig. 2.1: Scénarios climatiques et stratégies choisis pour la modélisation et la rédaction des récits.

3 Approche méthodologique

3.1 Aperçu de la procédure

Afin de prédire l'évolution des paysages futurs dans un climat beaucoup plus chaud, nous avons combiné différentes approches de modélisation scientifique: des approches qualitatives, basées sur des déductions logiques, et des approches quantitatives, basées sur des calculs. En suivant une approche qualitative, nous avons analysé les chaînes d'impacts entre le changement climatique, les acteurs et les modifications du paysage sur la base d'une recherche dans la littérature scientifique et d'entretiens avec des experts. Sur cette base, nous avons développé un modèle systémique conceptuel qui décrit les modifications possibles du paysage en fonction des différentes voies d'action. L'approche quantitative a visé à modéliser les changements possibles de l'utilisation du sol et de la composition de la végétation à l'aide des données d'utilisation du sol de la Statistique suisse de la superficie, des données sur la végétation d'InfoFlora, de l'Inventaire forestier national suisse du WSL et l'intégration, grâce au projet ValPar.CH, ainsi que de projections déjà existantes de la distribution potentielle des végétaux. Les deux approches de modélisation ont été combinées de telle sorte que les connaissances sur les chaînes d'impacts issues du modèle systémique conceptuel soient intégrées dans la définition des règles de modélisation des changements d'affectation du sol. Inversement, nous avons utilisé les résultats du modèle sur les changements de végétation pour décrire en détail les changements de paysage dans le modèle conceptuel du système. Les résultats des modèles sont décrits au chapitre 4.

Les scénarios proprement dits des changements du paysage en réponse au changement climatique et au choix de stratégie proactive ou réactive d'adaptation sont présentés dans des récits au chapitre 5, et des images. Les récits décrivent des randonnées à travers les paysages futurs dans les régions d'étude exposées à des températures beaucoup plus chaudes. Les images montrent des vues panoramiques à 360° de paysages témoins, dont les textes et les images doivent permettre de faire l'expérience des paysages futurs dans un climat beaucoup plus chaud. Les connaissances scientifiques issues des modèles qualitatifs et quantitatifs sont illustrées dans les textes et les images à l'aide de détails concrets. Par exemple, pour illustrer le risque accru d'incendie de forêt, les images montrent plusieurs panaches de fumée et les récits décrivent des endroits brûlés dans la forêt. Enfin, nous avons réalisé des cartes des changements possibles dans l'utilisation du sol et la végétation et, pour chaque cas d'étude, une courte vidéo destinée à attirer l'attention sur les effets du changement climatique sur le paysage. Les chapitres suivants décrivent en détail la démarche méthodologique.

3.2 Développement de scénarios qualitatifs

Les scénarios qualitatifs ont été développés selon la procédure méthodologique illustrée (Fig. 3.1) et décrite ci-dessous.

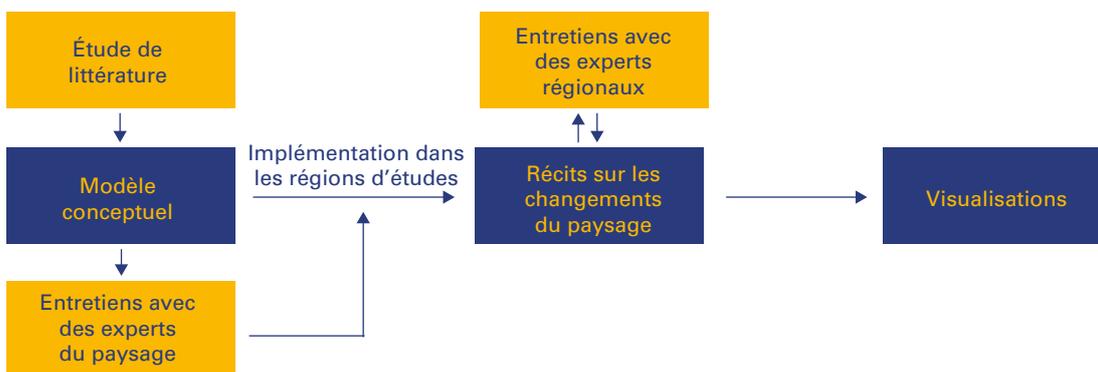


Fig. 3.1: Aperçu de la procédure méthodologique pour le développement de scénarios qualitatifs.

3.2.1 Modèle systémique conceptuel

La première étape du travail a consisté à élaborer un modèle systémique conceptuel des effets du changement climatique sur les paysages en Suisse, en tenant compte de la littérature scientifique, des documents stratégiques des politiques publiques sur l'adaptation au changement climatique, ainsi que des connaissances des spécialistes du paysage. L'objectif de ce modèle systémique était d'intégrer conceptuellement les effets directs et indirects (sectoriels) connus du changement climatique dans des chaînes d'impacts et de mettre en évidence le lien entre le changement climatique et les modifications des paysages. Les interactions entre les différentes chaînes d'impacts devaient également être mises en évidence.

Structure de base

Siegrist (2022) propose une conceptualisation des chaînes d'impacts du changement climatique, des acteurs et du paysage, basée sur le concept de «driving forces» développé par Bürgi *et al.* (2004). Cette conceptualisation d'une compréhension globale du paysage et de la distinction entre les effets directs et indirects du changement climatique (fig. 3.2) a servi de base à la structure du modèle conceptuel du système.

Dans la conceptualisation, le changement climatique est considéré comme l'un des nombreux facteurs de modification du paysage. Le changement climatique peut déclencher directement des modifications du paysage (impacts directs), mais des chaînes d'action indirectes sont également prises en compte, dans lesquelles seules les réactions humaines au changement climatique déclenchent certaines modifications du paysage.

Les acteurs peuvent choisir parmi les trois types de comportement suivants:

- Ne pas réagir à un effet du changement climatique (chaînes d'impacts directs)
- Atténuer l'impact direct du changement climatique par leurs actions (chaînes d'impacts indirects de type I)
- Adapter son comportement en réponse à un impact direct du changement climatique (chaînes d'impacts indirects de type II)

La figure 3.3 présente des exemples de voies d'action directes et de voies d'action indirectes de type I et II.

La conceptualisation vise une approche globale du paysage qui ne se focalise pas uniquement sur l'analyse des modèles et processus spatiaux au sein des paysages, mais qui considère le paysage comme «une partie de territoire telle que perçue par les populations, dont le caractère résulte de l'action de facteurs naturels et/ou humains et de leurs interrelations» (Council of Europe 2000:2). Par conséquent, le paysage est consi-

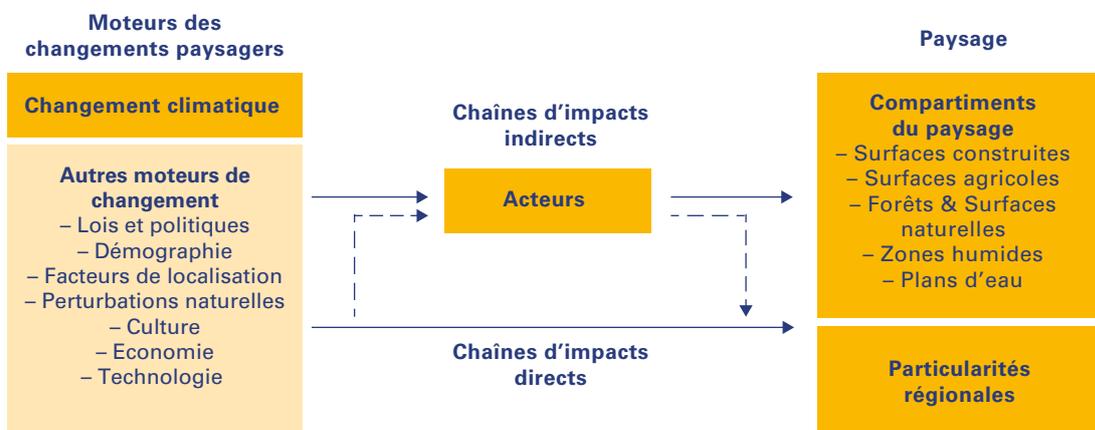


Fig. 3.2: Conceptualisation des impacts entre les changements climatiques, acteurs et paysage d'après Sigrist (2022).

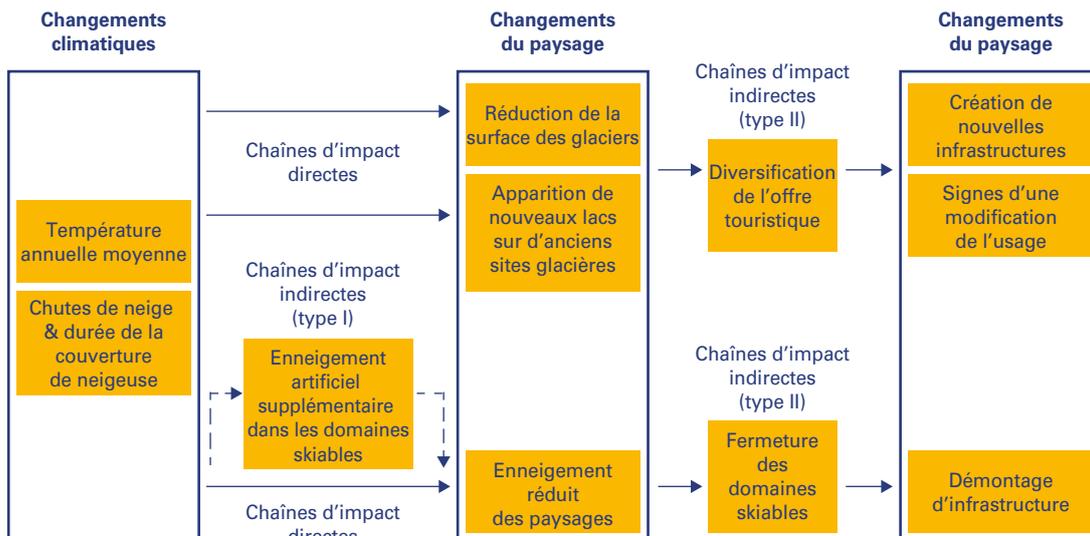


Fig. 3.3: Exemples de changements du paysage dans les deux typologies (I et II).

déré comme étant composé d'éléments physiques et de surfaces (compartiments paysagers) ainsi que de ce que l'on appelle les particularités régionales. L'inclusion des particularités régionales souligne le fait que les paysages ont des caractéristiques uniques et que le changement climatique aura donc un impact différent et spécifique sur les paysages, sur les perceptions humaines de ces paysages et sur les services paysagers qu'ils fournissent.

Pour pouvoir spécifier dans le modèle conceptuel du système quelles parties d'un paysage sont concernées par un changement, nous avons eu recours à la nomenclature européenne CORINE d'occupation du sol (land cover), une nomenclature hiérarchique à trois niveaux. Les deux premiers niveaux ont été pris en compte avec de légères adaptations.

Afin d'élaborer la structure de base du modèle conceptuel du système, les interactions entre le changement climatique, les acteurs et le paysage ont été traduites sous forme de tableau. Cela a permis d'extraire les chaînes d'impacts de la littérature scientifique et des documents des politiques sectorielles et de les présenter sous une forme cohérente et comparable. Les chaînes d'impacts interdépendantes ont été reliées entre elles. Chaque chaîne d'impacts indirects a été reliée au moins à une chaîne d'impacts directs. La structure du modèle conceptuel du système est décrite en détail par Siegrist (2022).

Le modèle conceptuel a été élaboré pour la Suisse. En ce qui concerne l'échelle géographique, les chaînes d'impacts prises en compte dans le modèle conceptuel sont celles qui ont des effets directement visibles sur le paysage ou qui peuvent provoquer des effets indirects.

Sources pour le contenu

La littérature scientifique sur les effets attendus du changement climatique sur les paysages a servi de première source de contenu pour le modèle systémique conceptuel. En tenant compte de l'état actuel de la recherche sur les effets du changement climatique sur les paysages, nous avons eu recours principalement à la littérature sur les effets sectoriels du changement climatique. L'étude bibliographique a été poursuivie jusqu'à ce qu'aucune nouvelle chaîne d'impacts pertinente n'ait pu être identifiée par compartiment paysager concerné. La liste des publications prises en compte est détaillée par Siegrist (2022).

Les documents publiés dans le cadre de la stratégie nationale d'adaptation au changement climatique ont servi de deuxième source de contenu. En effet, cette stratégie guidera les futures mesures d'adaptation à l'évolution des conditions climatiques, qui auront à leur tour des effets indirects significatifs sur le paysage. Outre les documents

adoptés par le Conseil fédéral «Adaptation aux changements climatiques en Suisse; objectifs défis et champs d'action» (Confédération suisse 2012) et «Adaptation aux changements climatiques en Suisse; plan d'action 2020–2025» (Confédération suisse 2020), les documents stratégiques des différents secteurs de la gestion des eaux, de la gestion des dangers naturels, de l'agriculture, de l'économie forestière, de l'énergie, du tourisme, de la gestion de la biodiversité, de la santé et du développement territorial ont été pris en compte, car ces secteurs sont les principaux responsables de la mise en œuvre des objectifs d'adaptation (Confédération suisse 2012). La liste des documents stratégiques pris en compte peut être consultée dans Siegrist (2022).

Interviews avec des spécialistes du paysage pour valider et compléter le modèle conceptuel du système

Après la recherche bibliographique, des interviews ont été menées avec des experts ayant une compréhension globale du paysage, dans le but (1) de situer les chaînes d'impacts dans le contexte paysager et d'étudier leur signification pour le paysage en tant que concept multidimensionnel, (2) d'approfondir le contenu de certaines chaînes d'impacts issues du modèle systémique conceptuel et (3) de vérifier que les chaînes d'impacts les plus importantes étaient incluses dans le modèle systémique conceptuel ou d'identifier les impacts manquants.

Au total, sept entretiens semi-directifs ont été réalisés, enregistrés, transcrits, codés et analysés. La sélection des personnes interrogées s'est faite sur la base du modèle conceptuel et des lacunes de connaissances identifiées. L'échantillon comprenait un spécialiste des compartiments paysagers forêt, agriculture et eaux, avec un accent supplémentaire sur le changement climatique ou le paysage, trois spécialistes de la dynamique du paysage et/ou de l'écologie du paysage et une experte en qualité esthétique du paysage.

3.2.2 Récits sur les paysages suisses avec +4°C de réchauffement

Les effets du changement climatique sur le paysage ont été synthétisés dans des «récits» (storylines en anglais) qui sont des textes à caractère narratif basés sur la science. Nous avons choisi ce média parce que les récits rendent les concepts abstraits plus tangibles, contribuent à l'assimilation et à la mémorisation des informations et peuvent motiver l'action (Harris 2020; Morris *et al.* 2019). Ainsi, les récits devraient contribuer à une compréhension globale des effets du changement climatique sur le paysage.

Les récits ont été rédigés dans un langage facile à comprendre et imagé et prennent la perspective d'un groupe de randonneurs dans leur vécu du paysage, offrant ainsi aux lectrices et lecteurs des possibilités d'identification faciles. Les paysages sont décrits de la manière la plus objective possible avec un accent sur les éléments visuels. Lorsque cela s'est avéré nécessaire pour la compréhension, des informations de fond sur les effets du changement climatique ont été intégrées dans les récits. La part de ces informations a toutefois été réduite au minimum afin que les récits soient formulés de la manière la plus concrète possible.

Les récits décrivent des promenades à travers les régions d'étude vers la fin du XXI^e siècle. La température moyenne est d'environ 4°C supérieure à la moyenne 1981–2010. Les itinéraires de promenade ont été choisis de manière à ce qu'il soit possible de faire référence à tous les éléments caractéristiques du paysage (Rodewald *et al.* 2014). L'action principale est précédée d'un court texte d'introduction destiné à orienter les lectrices et lecteurs. Ces textes expliquent le moment de l'action et les conditions climatiques prédominantes. Les lectrices et les lecteurs sont également rendus attentifs au fait que d'autres processus, en plus du changement climatique, auront un impact sur le paysage d'ici la fin du XXI^e siècle, mais que ceux-ci ne sont pas abordés dans le texte.

Le modèle conceptuel du système ainsi que les résultats des entretiens avec les experts en paysage ont servi de base pour la formulation des récits. Il n'a pas été possible d'inclure dans les récits toutes les possibilités d'action du modèle conceptuel du système. Certaines n'ont pas été retenues car elles concernent des compartiments paysagers qui n'apparaissent pas dans les paysages de l'étude. Toutefois, les chaînes d'im-

pacts considérées comme particulièrement importantes pour le paysage dans le modèle conceptuel du système ou par les experts en paysage ont été pris en compte.

Pour les paysages décrits dans les récits, d'autres scénarios futurs sont également réalistes. Le paysage réel en 2085 sera très probablement différent de celui décrit dans les récits, d'une part parce que les récits se concentrent sur le changement climatique en tant que moteur des modifications paysagères et ne tiennent pas compte d'autres facteurs, par exemple des changements sociaux ou politiques abrupts, qui pourraient aussi avoir un impact sur le paysage. D'autre part, notre compréhension actuelle ne permet pas de prédire l'avenir de manière déterministe même s'il existe un consensus scientifique sur de nombreux processus déclenchés par le changement climatique. Néanmoins, la description scientifiquement fondée d'un paysage futur possible dans un récit peut contribuer à la compréhension des effets du changement climatique sur les paysages et déclencher une réflexion approfondie sur cette thématique.

Les récits abordent conjointement les effets directs et indirects du changement climatique sur les paysages. L'objectif est de montrer clairement aux lecteurs que la réaction humaine au changement climatique a également un impact sur le paysage. Pour y parvenir, les récits ont été rédigés par endroits en deux variantes: l'une comme conséquence de la stratégie réactive et l'autre comme conséquence de la stratégie proactive (cf. chapitre 2.4). Les deux questions suivantes ont servi d'orientation lors de l'élaboration des variantes:

- Comment le paysage évoluera-t-il si la politique et la société ne modifient pas leur comportement face aux effets du changement climatique en anticipant, mais en réagissant passivement à ces effets ?
- Comment le paysage évoluera-t-il si la politique et la société modifient leur comportement face au changement climatique de la manière la plus anticipatrice possible et font face aux effets par des stratégies et mesures d'adaptation actives ?

Interviews avec des experts régionaux pour préciser les récits

Une fois les récits rédigés (Fig. 3.1) et afin de les préciser en fonction des spécificités et des caractéristiques régionales, nous avons mené des entretiens avec des experts régionaux connaissant bien les processus liés au paysage dans les régions de l'Entremont et du Seeland. Lors des interviews, nous avons mis l'accent sur les effets indirects du changement climatique sur les paysages car ceux-ci sont fortement influencés par les modes d'utilisation des terres par les acteurs régionaux.

La sélection des personnes interrogées s'est faite sur la base des récits et des thèmes principaux qui y sont traités. Parmi les personnes interrogées se trouvaient des gardes-forêtiers des régions d'étude, des responsables du tourisme, des conseillers agricoles, des membres de conseils municipaux ainsi que d'associations communales régionales, et enfin des représentants de l'industrie et de la recherche. Au total, au moins cinq personnes ont été interrogées dans chaque région dans le cadre d'entretiens semi-directifs.

Les questions et l'entretien étaient structurés en fonction des thèmes principaux des récits. Tous les thèmes n'ont pas été abordés avec toutes les personnes, car cela aurait souvent dépassé le cadre temporel des entretiens, mais chaque thème a été abordé avec au moins une personne par région. Les entretiens ont permis d'identifier les effets déjà perceptibles du changement climatique, les défis (et les opportunités) qui en résultent pour la région, ainsi que les mesures d'adaptation et leur probabilité de mise en œuvre dans la région.

Sur la base des interviews, nous avons ajouté aux récits les changements paysagers manquants, les mesures d'adaptation au changement climatique et les particularités régionales. Nous avons également supprimé des récits les pratiques d'utilisation du sol ou les mesures d'adaptation qui avaient été abordées dans les récits mais qui étaient considérées comme irréalistes par les experts régionaux. Toutes les révisions effectuées et les raisons des changements ont été documentés.

3.3 Modélisations quantitatives

La modélisation quantitative des modifications du paysage en cas de réchauffement de 4°C selon une stratégie proactive ou réactive d'adaptation au changement climatique a été faite de la manière suivante: le modèle se composait d'une série de sous-modèles qui prédisaient la répartition des communautés végétales en fonction des deux stratégies d'adaptation. Les connaissances tirées du modèle conceptuel du système (cf. chap. 3.2) ainsi que le cadre des politiques sectorielles et les conditions préalables à certains changements d'utilisation du sol ont été intégrées dans le modèle à titre de contraintes. De nouveaux indicateurs paysagers ont été dérivés à partir des résultats de la modélisation quantitative. Enfin, les représentations cartographiques des résultats ont fourni des informations quantitatives pour les visualisations (cf. chap. 3.4).

La figure 3.4 montre les différentes étapes du processus de travail:

1. **Modèle de prédiction:**
Entraînement d'un réseau neuronal pour prédire les adéquations d'utilisation des terres sur la base de leurs utilisations passées ainsi que des variables climatiques et socio-économiques;
2. **Modèle d'allocation:**
Allocation spatiale des changements potentiels d'affectation du sol sur la base de la demande potentielle pour certaines utilisations et de règles spécifiques de changement d'affectation;
3. **Modèle des communautés végétales:**
Modélisation des répartitions spatiales potentielles des communautés végétales sur la base de projections de distribution potentielle d'espèces végétales et dans des conditions climatiques modifiées. Ces projections d'espèces étaient déjà disponibles et produites par le projet ValPar.CH (valpar.ch; Adde *et al.* 2023);
4. **Conditions marginales/restrictions:**
Contraintes sur l'expansion des communautés végétales ou sur d'éventuels changements d'utilisation du sol, dérivées des cadres juridiques des politiques sectorielles ainsi que des prescriptions d'une stratégie réactive ou proactive d'adaptation au changement climatique, conformément au modèle conceptuel du système utilisée dans ce projet.

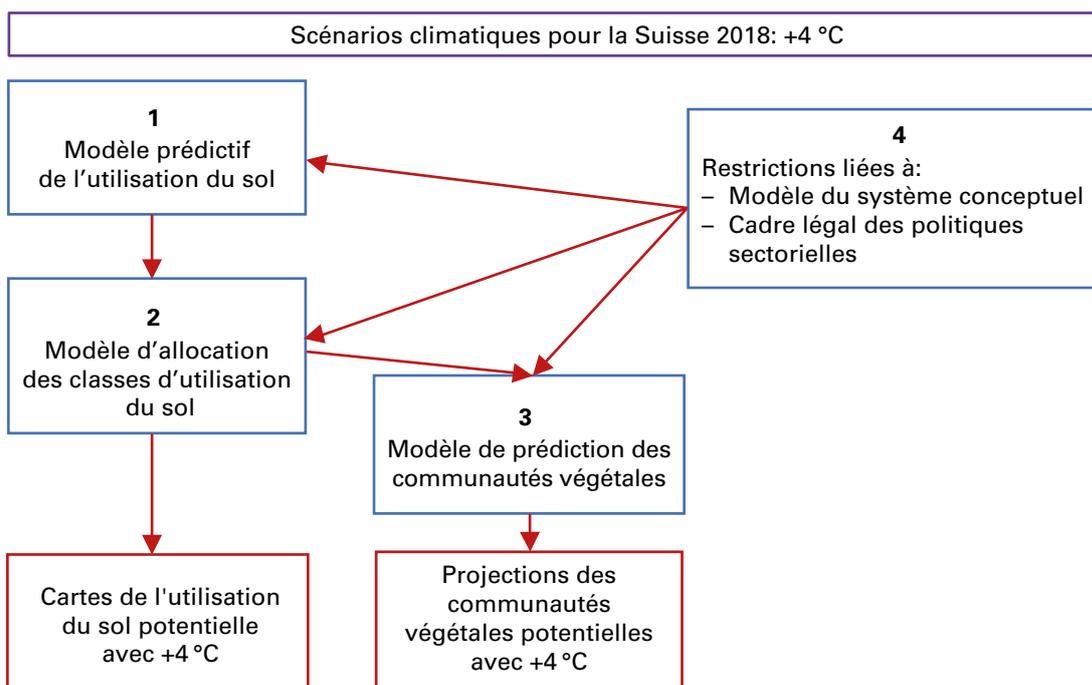


Fig. 3.4: Organigramme des sous-modèles.

Il en a résulté des cartes des utilisations possibles du sol et des communautés végétales dans un climat plus chaud de 4°C.

3.3.1 Modèle de prédiction de l'utilisation du sol

Le modèle de l'utilisation du sol est un réseau neuronal basé sur l'intelligence artificielle qui prédit l'adéquation du paysage pour 14 classes d'utilisation du sol de la Statistique suisse de la superficie à l'aide de différentes variables prédictives.

Classes d'utilisation du sol

Le réseau neuronal modélise les classes d'utilisation du sol à partir des cartes d'utilisation et de couverture du sol de l'Office fédéral de la statistique (OFS, s.a.). Parmi ces 17 classes d'utilisation du sol (NOAS04_17), trois («Surfaces de transport», «Lacs» et «Rivières») ont été maintenues constantes dans tous les calculs, soit parce que leurs changements ne peuvent pas être modélisés de manière fiable («Surfaces de transport»), soit parce que les changements attendus pendant la période modélisée sont négligeables («Lacs» et «Rivières»). Les nouveaux lacs alpins résultant du retrait des glaciers constituent une exception. Ces lacs apparaissent dans les simulations. Les classes d'utilisation du sol modélisées sont «Aires industrielles et artisanales», «Aires de bâtiments», «Surfaces d'infrastructure spéciale», «Espaces verts et lieux de détente», «Forêt», «Forêt buissonnante», «Autres surfaces boisées», «Terres arables», «Arboriculture fruitière, viticulture, horticulture», «Prairies naturelles, pâturages locaux», «Alpages», «Végétation improductive», «Surfaces sans végétation», et «Glaciers, névés».

Prédicteurs

Pour l'entraînement du réseau neuronal, plusieurs variables spatialement explicites ont été utilisées avec une résolution de 1 ha pour toute la Suisse. A partir des cartes d'utilisation du sol pour le présent (2012–18) et de trois étapes passées de la collecte de données pour la statistique de la superficie (1979–85, 1992–97, 2004–09), le réseau neuronal a appris les tendances des changements d'utilisation du sol au fil du temps. A partir de prédicteurs climatiques, écologiques et socio-économiques, il a appris d'autres règles pour l'apparition de différentes classes d'utilisation du sol sur une surface donnée. Des exemples de tels prédicteurs sont les classes d'utilisation du sol prédominantes dans le voisinage, la distance par rapport aux voies de communication et aux cours d'eau, les caractéristiques du sol et du terrain, les variables topo-climatiques telles que l'ensoleillement, les frontières politiques et la densité de population dans le voisinage.

Sortie du modèle

Pour chacune des 14 classes d'utilisation du sol, le réseau neuronal établit une carte qui montre avec quelle probabilité la classe d'utilisation du sol peut être trouvée sur un hectare donné (= un pixel de la carte) en Suisse. Dans le modèle d'allocation (section suivante), ces cartes sont combinées en une seule carte d'utilisation du sol.

3.3.2 Modèle d'allocation des classes d'utilisation du sol

Le modèle d'allocation combine les cartes de probabilité générées par le réseau neuronal pour les différentes classes d'utilisation du sol en une carte de probabilité de toutes les classes d'utilisation du sol. Ceci se base d'une part sur le besoin ou la demande d'une classe d'utilisation du sol donnée et d'autre part sur d'autres règles relatives aux changements d'utilisation du sol.

Besoin d'utilisation du sol

Nous avons déduit les besoins en matière d'utilisation du sol de l'évolution de l'occupation des terres dans le passé (de 1979 à 2018). Une extrapolation linéaire des tendances passées a permis de calculer, pour chaque classe d'utilisation du sol, la part de surface attendue à l'avenir. L'extrapolation des tendances de l'utilisation des terres a servi d'estimation de base des changements futurs du paysage. Ces estimations ont été ensuite limitées sur la base des directives imposées par les lois fédérales sur l'aménagement du territoire, les forêts, l'agriculture ainsi que la protection de la nature et du paysage.

Tab. 3.1: Règles relatives aux changements d'affectation du sol dans le modèle d'allocation.

«Aires de bâtiments»	Les «Aires de bâtiments» ne peuvent pas être transférées dans d'autres classes d'utilisation du sol car de nombreuses ressources ont été utilisées dans le passé pour transformer ces terres en surfaces d'habitat.
	L'extension des «Aires de bâtiments» est empêchée à partir du milieu du XXI ^e siècle afin de simuler les prescriptions plus strictes de la loi sur l'aménagement du territoire en matière de développement urbain vers l'intérieur.
«Terres arables», «Prairies naturelles, pâturages locaux».	Les classes «Terres arables» et «Prairies naturelles, pâturages locaux» peuvent toujours se confondre pour représenter des systèmes agricoles mixtes. Ces deux classes peuvent également se transformer en «Forêt», «Forêt buis-sonnante» et «Végétation improductive», mais uniquement en fonction de la tendance extrapolée de l'extension future de la forêt. En outre, ces classes peuvent se transformer en «Aires de bâtiments», mais uniquement jusqu'au milieu du siècle.
«Prairies alpines»	«Prairies alpines» peut se transformer en «Forêts», «Forêts buissonnantes» et «Bosquets». En outre, elles peuvent être converties en «Végétation improductive» afin de simuler le processus de défrichement de zones forestières pour préserver des paysages agricoles ou anthropiques de valeur, comme le permet la loi fédérale révisée sur les forêts.
«Alpages»	Les «Alpages» peuvent passer à «Forêt» en passant par «Forêt buissonnante» afin de simuler la dynamique naturelle de la végétation après l'abandon des pâturages d'estivage en montagne. C'est pourquoi les transitions le long de cette séquence ne sont possibles que vers la forêt, c'est-à-dire que la «Forêt» ne peut pas se transformer en «Bosquets» ou en «Forêt buissonnante».
«Forêt»	L'extension de la «Forêt» sur les «Aires de bâtiments» et les «Terres agricoles» est empêchée, mais elle est possible sur les «Alpages» afin de simuler l'abandon des pâturages d'estivage. Comme l'abandon futur des pâturages d'estivage est déterminé exclusivement par l'extrapolation des tendances passées, le déplacement de la limite des arbres vers le haut dans les régions alpines est principalement guidé par la gestion des terres et non par le changement climatique, qui montrerait une colonisation beaucoup plus rapide des prairies alpines par les forêts.
«Forêt buissonnante», «Autres surfaces boisées», «Végétation improductive»	Les classes d'utilisation du sol «Forêt», «Forêt buissonnante» et «Végétation improductive» ne sont pas toujours clairement délimitées. C'est pourquoi nous admettons que ces classes se chevauchent. De plus, les classes «Forêt buissonnante» et «Prairies naturelles, pâturages locaux» peuvent se chevaucher afin de simuler la formation de nouvelles haies. Celles-ci peuvent être plantées à des fins agricoles (protection contre le vent) ou pour préserver la biodiversité (en tant qu'habitat).
«Arboriculture fruitière, viticulture, horticulture»	Les surfaces d'«Arboriculture fruitière, viticulture, horticulture» sont maintenues afin de refléter les efforts de conservation. Cette classe peut reprendre des surfaces occupées par des «Terres arables», des «Prairies naturelles, pâturages locaux», des «Forêts buissonnantes» ou de la «Végétation improductive». Les transitions vers la classe «Arboriculture fruitière, viticulture, horticulture» ne sont toutefois possibles que tant qu'elles remplacent des pertes passées. Cette classe était en recul dans le passé et pour l'avenir, nous simulons son maintien.
«Glacier, névé»	La dynamique naturelle de retrait des glaciers est simulée par la succession «Glacier, névé» à «Végétation improductive» en passant par «Surfaces improductives». Les transitions entre ces classes ne sont possibles que vers la «Végétation improductive». C'est la seule classe qui peut remplacer les «Surfaces improductives».
«Végétation improductive»	La classe «Végétation improductive» peut devenir «Forêt buissonnante», «Autres surfaces boisées» ou «Forêt». Cette dernière simule le reboisement. En outre, la «Végétation improductive» peut se transformer en «Alpages» pour simuler l'aménagement de nouveaux pâturages d'estivage.

Règles relatives aux changements d'utilisation du sol

Comme toutes les classes d'utilisation du sol ne peuvent pas être converties en n'importe quelle autre classe, certaines règles ont été imposées au modèle d'allocation. Celles-ci sont énumérées dans le tableau 3.1. Les changements d'affectation du sol physiquement impossibles (p.ex. la transformation de surfaces d'habitat en glaciers) ou très improbables (p.ex. la transformation de surfaces d'habitat en forêts) ont été exclus.

Allocation des changements d'utilisation du sol

Sur la base des hypothèses relatives aux besoins d'utilisation des terres et des règles relatives aux changements d'utilisation, nous avons utilisé les algorithmes du programme CLUE-S (Verburg *et al.* 2002) pour localiser les futurs changements possibles d'utilisation des terres. Le programme produit des cartes des utilisations potentielles du sol pour trois périodes dans le futur.

Dynamique des glaciers

Afin de représenter précisément la dynamique du retrait des glaciers et la formation de nouveaux lacs à partir de leurs origines, nous avons également utilisé les résultats d'un modèle indépendant de glaciers et de lacs développé par le réseau d'observation GLAMOS (Jouvet *et al.* 2019; Steffen *et al.* 2022).

3.3.3 Modèle de prédiction des communautés végétales

Le modèle de prédiction des associations végétales a permis d'affiner les classes d'utilisation du sol prédites par le modèle d'allocation. Les associations végétales sont des groupes d'espèces végétales qui ont des exigences écologiques similaires et qui sont donc généralement présentes ensemble. Par exemple, les surfaces de la classe «Forêt» ont été subdivisées en fonction des différentes associations forestières qui les composent.

La répartition potentielle d'une association végétale dépend des conditions pédoclimatiques locales (c'est-à-dire des caractéristiques combinées du sol et du climat). Nous avons déterminé la répartition de 84 associations végétales sur la base d'observations de terrain provenant des bases de données d'InfoFlora et de l'inventaire forestier national du WSL pour un total initial de 800 espèces. La distribution potentielle actuelle et future de ces espèces provient des projections du projet ValPar.CH (Adde *et al.* 2023). A partir de ces cartes de distribution potentielle pour chaque espèce individuelle, nous avons dérivé la distribution potentielle actuelle et future de 12 communautés forestières. Les changements au sein des communautés herbacées n'ont pas été représentés car ils n'induisent pas de changements significatifs dans le paysage. Comme le pH du sol a une grande influence sur la présence des associations végétales, nous l'avons utilisé comme autre prédicteur et avons divisé la carte géologique en deux classes: les roches qui produisent des conditions de sol alcalines et les roches qui produisent des sols neutres ou acides.

3.3.4 Évaluations et indicateurs spécifiques

Les modèles de changement d'utilisation du sol et de végétation permettent de répondre à des questions spécifiques, par exemple en ce qui concerne l'aspect futur potentiel des paysages, les risques liés aux dangers naturels ou l'adéquation à des systèmes particuliers d'utilisation et de gestion des sols. Trois exemples d'indicateurs paysagers sont présentés ci-dessous.

«Verdissement» et «grisonnement».

Un «verdissement» se produit lorsque la végétation colonise des zones de haute altitude et modifie ainsi la couleur du paysage. Un «grisonnement» indique les nouvelles surfaces de sédiments gris qui se sont formées suite au retrait des glaciers.

Propagation de peuplements forestiers facilement inflammables

Le risque d'incendie de forêt est plus élevé pour certaines associations végétales que

pour d'autres, notamment les peuplements à forte proportion de pins sylvestres et de chênes qui augmentent le risque d'incendie de forêt lors de périodes de chaleur prolongées. Cet indicateur combine les répartitions des communautés de pins sylvestres, des communautés d'autres espèces de pins et des communautés de chênes. Le pin sylvestre étant particulièrement inflammable, sa présence est doublement pondérée dans l'indicateur du risque d'incendie de forêt.

Potentiel pour les systèmes sylvo-pastoraux

Par systèmes sylvo-pastoraux (ou pâturages boisés), on entend des pâturages plantés de nombreux arbres isolés. Ils présentent de nombreux avantages pour l'équilibre hydrique du sol, la fertilité du sol, la diversité des espèces et des paysages ainsi que le stockage du carbone. En outre, les arbres offrent de l'ombre aux animaux et fournissent du bois. Les systèmes sylvo-pastoraux sont donc des mesures appropriées pour l'adaptation au changement climatique.

Pour modéliser le potentiel des systèmes sylvo-pastoraux, le modèle combine l'extension de la surface forestière selon les taux de croissance observés durant la période 1979–84 avec l'aptitude à la production agricole («Terres arables») sur les prairies et dans les alpages. Le modèle suppose une plus grande aptitude à l'agriculture si les zones sont bien desservies ou si la production agricole y est encouragée. Dans les conditions climatiques actuelles, le modèle montre l'invasion de la forêt sur les prairies, les pâturages et les alpages en dessous de la limite de la forêt liée au climat. Le modèle montre en outre jusqu'où la forêt pourrait s'étendre au-delà de la limite actuelle de la forêt dans les alpages en cas de réchauffement climatique de 4°C. Ces zones pourraient être transformées en systèmes sylvo-pastoraux. Pour la région de l'Entremont, le modèle a calculé l'étendue des surfaces à fort potentiel pour les systèmes sylvo-pastoraux.

3.4 Visualisations

Trois états ont été visualisés pour chacune des deux régions abordées dans cette étude: l'état actuel, et les états possibles dans un climat plus chaud de 4 en moyenne selon une stratégie d'adaptation «réactive» ou «proactive» (chap. 2.4, fig. 2.1). Des images panoramiques et une courte animation ont été créées pour chaque région. Les récits ainsi que les modélisations quantitatives sont à la base des visualisations. Elles représentent en particulier les utilisations du sol qui sont particulièrement touchées par le changement climatique, avec des éléments visibles: cyclistes, randonneurs comme symbole du tourisme; lac de barrage, panneaux solaires comme symbole de l'économie énergétique, etc.

Pour la région du Moyen Pays, inspirée par le Seeland, un collage de photos a été assemblé pour former une image panoramique à 360°. Pour la région de montagne, deux photos panoramiques de la région de l'Entremont ont été prises depuis un site situé au-dessus de la commune de Liddes (VS) à l'aide d'un appareil photo numérique grand angle et recomposées. Les états futurs potentiels décrits dans les récits ont été intégrés dans les photos panoramiques des paysages sous forme de photomontages. Les détails sur les communautés végétales futures possibles et leur apparence ont été tirés des modélisations de la végétation. En particulier, la montée de la limite des forêts dans l'espace alpin a été visualisée sur la base des résultats de ces modèles. La saison représentée sur les images est l'été (juillet-août).

Les images panoramiques ont été préparées de manière à ce que l'on puisse s'y déplacer dans un navigateur Internet sur un ordinateur ou un smartphone. Des extraits de ces images illustrent les récits du présent rapport. Une animation a également été créée pour chaque région en guise de teaser. Les animations sont courtes, moins d'une minute, afin qu'elles puissent être partagées sur les médias sociaux. Les photos panoramiques et les animations sont disponibles sur le site web du projet.

4 Résultats: les principales modifications du paysage en Suisse en réponse au changement climatique

Dans ce chapitre, nous synthétisons les résultats de l'élaboration qualitative des scénarios et de la modélisation quantitative. Dans la description des résultats, nous adoptons une approche globale du paysage. C'est pourquoi le chapitre n'est pas structuré en fonction de l'utilisation du sol, mais en fonction des zones d'étude que sont les régions de montagne et le Moyen Pays. Ce chapitre explique les changements des éléments physiques du paysage. La manière dont les paysages futurs seront vécus dans un climat plus chaud de 4°C est présentée dans les récits (chap. 5).

4.1 Modifications du paysage à grande échelle dans toute la Suisse

Le changement climatique modifiera les paysages suisses, mais il ne provoquera pas de changements importants dans les classes d'utilisation du sol. Le recul des glaciers en haute montagne constitue une exception. Cette classe d'utilisation du sol diminuera en surface (fig. 4.1). Les surfaces d'exploitation des alpages pourraient également se transformer naturellement en forêts clairsemées ou buissonnantes et finalement en forêts.

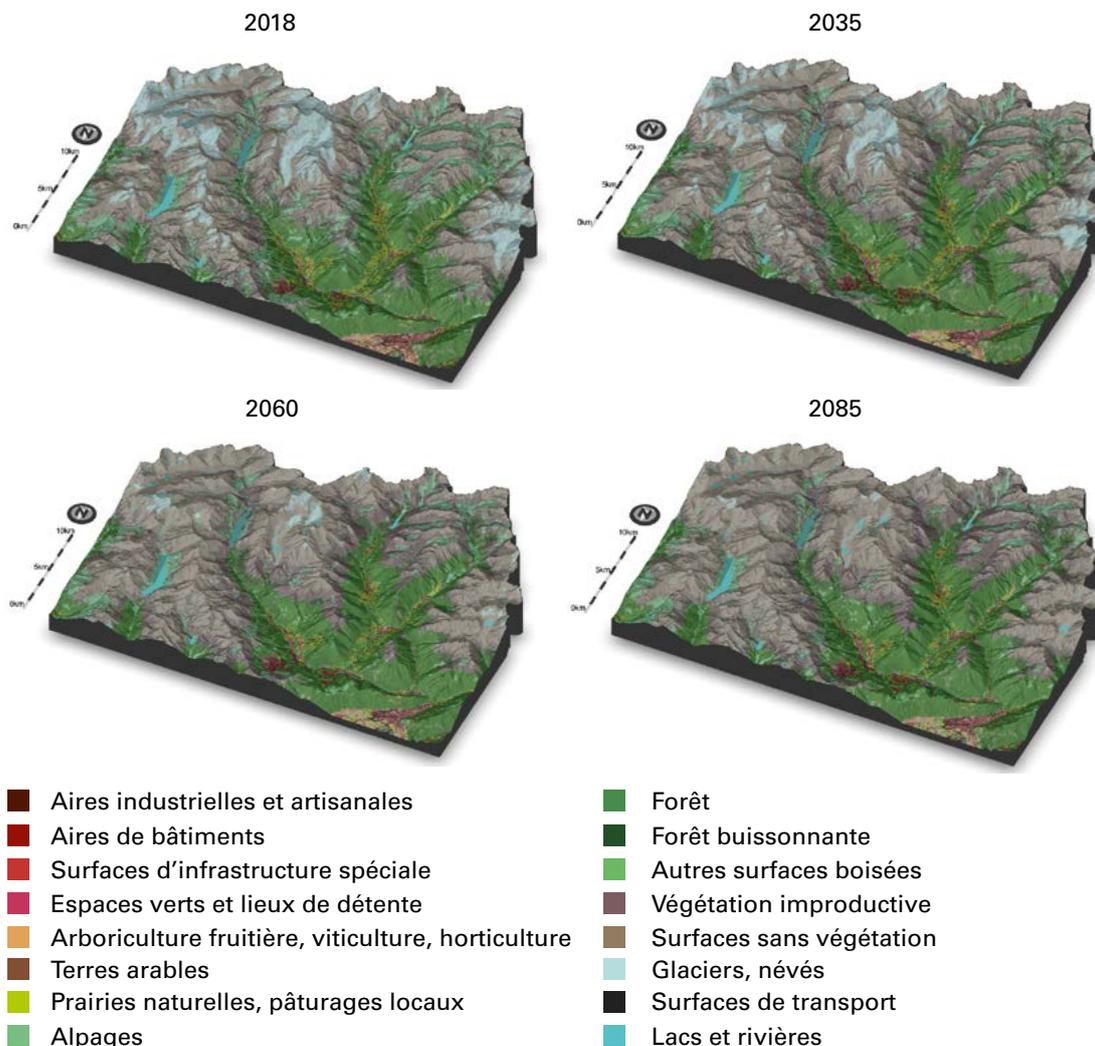


Fig. 4.1: Changements modélisés du potentiel d'utilisation du sol dans la région de l'Entremont. Le recul de la classe «Glaciers, névés» est frappant. En outre, les «Alpages» actuels sont remplacés par des «Forêts buissonnantes» et des «Forêts».

L'extension spatiale réelle des différentes utilisations du sol est toutefois conditionnée de manière anthropique par le cadre légal, comme par exemple la loi sur l'aménagement du territoire ou la loi sur les forêts, ou par des politiques sectorielles ou politiques régionales, par exemple la poursuite de l'utilisation ou l'abandon de terres agricoles marginales dans le cadre, par exemple, de la Politique pour les espaces ruraux et les régions de montagne (PERM). Au sein des différentes classes d'utilisation du sol, le changement climatique peut toutefois entraîner des modifications importantes du paysage. L'humain sera à nouveau le premier responsable de l'aspect futur des zones habitées, des surfaces agricoles et des forêts exploitées. Selon la stratégie réactive ou proactive d'adaptation au changement climatique (cf. chap. 2.4), les modèles font apparaître des changements paysagers différents.

Un climat plus chaud modifie les conditions de croissance de la végétation, ce qui peut entraîner d'importants déplacements des associations végétales naturelles. Cela modifiera notamment l'aspect des forêts. La plupart des surfaces forestières connaîtront un changement d'associations végétales, les principales espèces d'arbres passant le plus souvent des conifères aux feuillus (Pluess *et al.* 2016). Dans un climat plus chaud de 4°C, les forêts de chênes pourront s'étendre fortement. Les hêtres céderont la place aux érables et aux tilleuls comme l'érable à feuilles d'obier et le tilleul à petites feuilles, espèces plus résistantes à la sécheresse. Les forêts de hêtres et d'épicéas, aujourd'hui fréquentes dans le Moyen Pays, pourront désormais s'implanter dans les Préalpes et l'arc jurassien. Les châtaigniers, aujourd'hui très répandus au Tessin, pourront trouver de bonnes conditions de croissance au nord des Alpes. Les changements naturels potentiels des associations forestières dans la région de l'Entremont et du Seeland sont représentés dans la figure 4.2. Il faut toutefois noter que les associations forestières du sud de l'Europe, qui ne sont pas encore présentes en Suisse aujourd'hui, n'ont pas été prises en compte dans les modélisations.

L'aspect réel des forêts dans un climat plus chaud de 4°C dépendra fortement de la gestion forestière. Étant donné que les associations forestières se développent sur plusieurs décennies, il est conseillé de commencer à changer les essences principales assez tôt, c'est-à-dire dès aujourd'hui si possible. Dans le cas contraire, les forêts subiront des dommages importants en raison des sécheresses, des températures extrêmes, des tempêtes et des incendies de forêt ou des attaques de parasites (Brang *et al.* 2016). L'économie forestière devra également faire face à la propagation d'espèces invasives telles que le robinier et les associations laurofoliées («laurophyllisation»). Selon nos modélisations, les aulnaies vertes, souvent dominantes aujourd'hui, reculeront avec la progression du changement climatique.

En ce qui concerne les dangers pour les forêts, le déplacement des associations forestières actuelles vers des altitudes plus élevées, en raison du réchauffement, augmentera le risque d'incendie de forêt dans le Jura et les Alpes (Pezzatti *et al.* 2016). Les résineux facilement inflammables (p. ex. les pins) s'installeront à des altitudes plus élevées. Les essences feuillues sont moins exposées aux incendies et peuvent être favorisées par une gestion active de la forêt. Toutefois, le risque d'incendie de forêt continuera d'augmenter, même en plaine, en raison de périodes de sécheresse plus longues et plus intenses (Pluess *et al.* 2016). Les températures plus élevées et la sécheresse croissante attendues avec le changement climatique vont augmenter le risque d'incendie de forêt dans toute la Suisse.

4.2 Modifications du paysage dans les régions de montagne

4.2.1 Des sommets gris et verts à la place des sommets blancs

Le recul des glaciers entraînera des changements radicaux dans les paysages de montagne suisses. Selon le scénario climatique RCP 8.5 sur lequel se basent les modélisations (cf. chap. 2.4), la plupart des glaciers de Suisse disparaîtront d'ici la fin du XXI^e siècle. En conséquence, de nouveaux habitats et de nouveaux lacs se formeront dans les dépressions de terrain (Steffen *et al.* 2022; Haeberli *et al.* 2013). Dans un premier temps, glaciers et névés laisseront leur place à des surfaces de rochers et d'éboulis sans végétation. Au

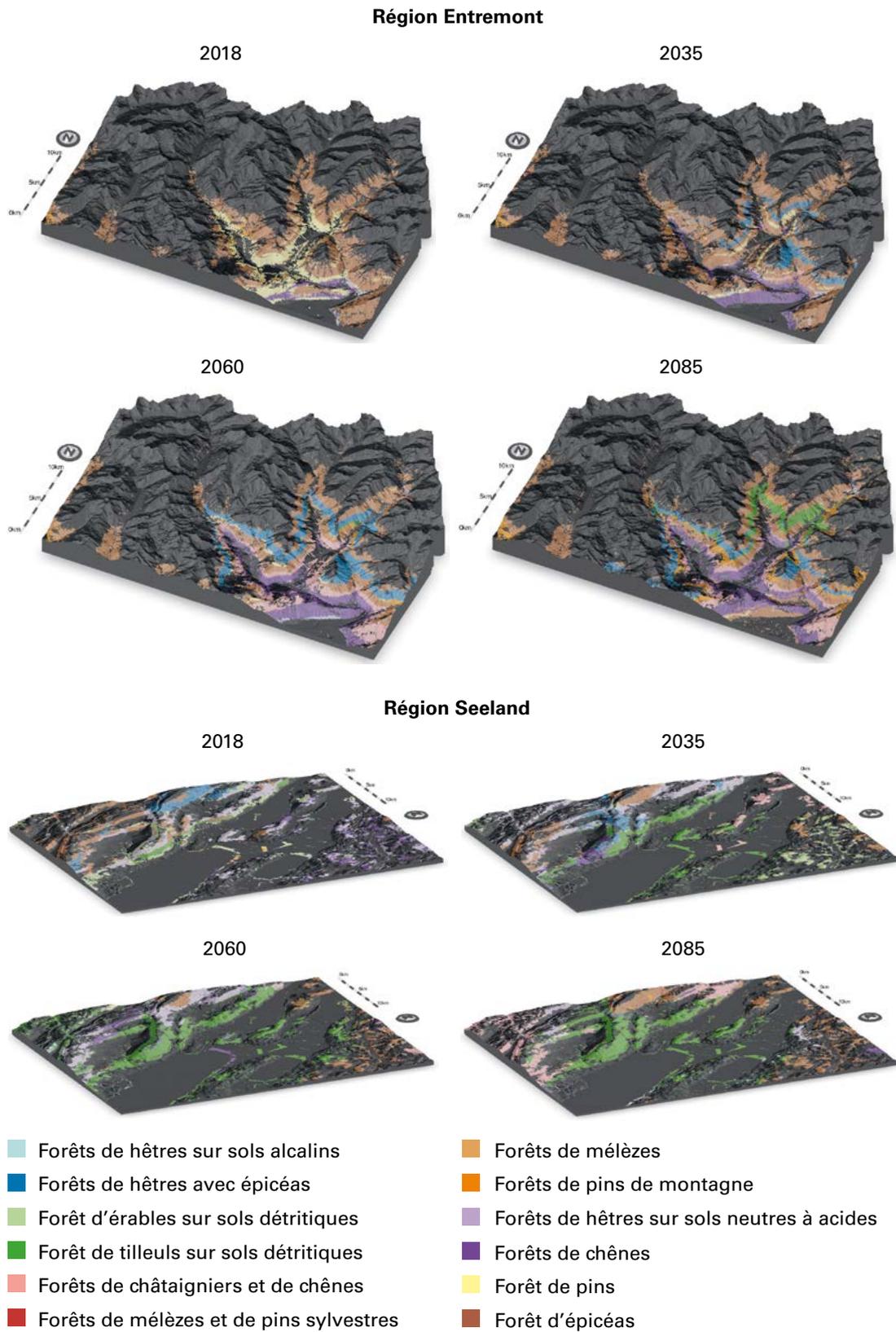


Fig. 4.2: Distribution potentielle des associations forestières dans les régions d'étude.

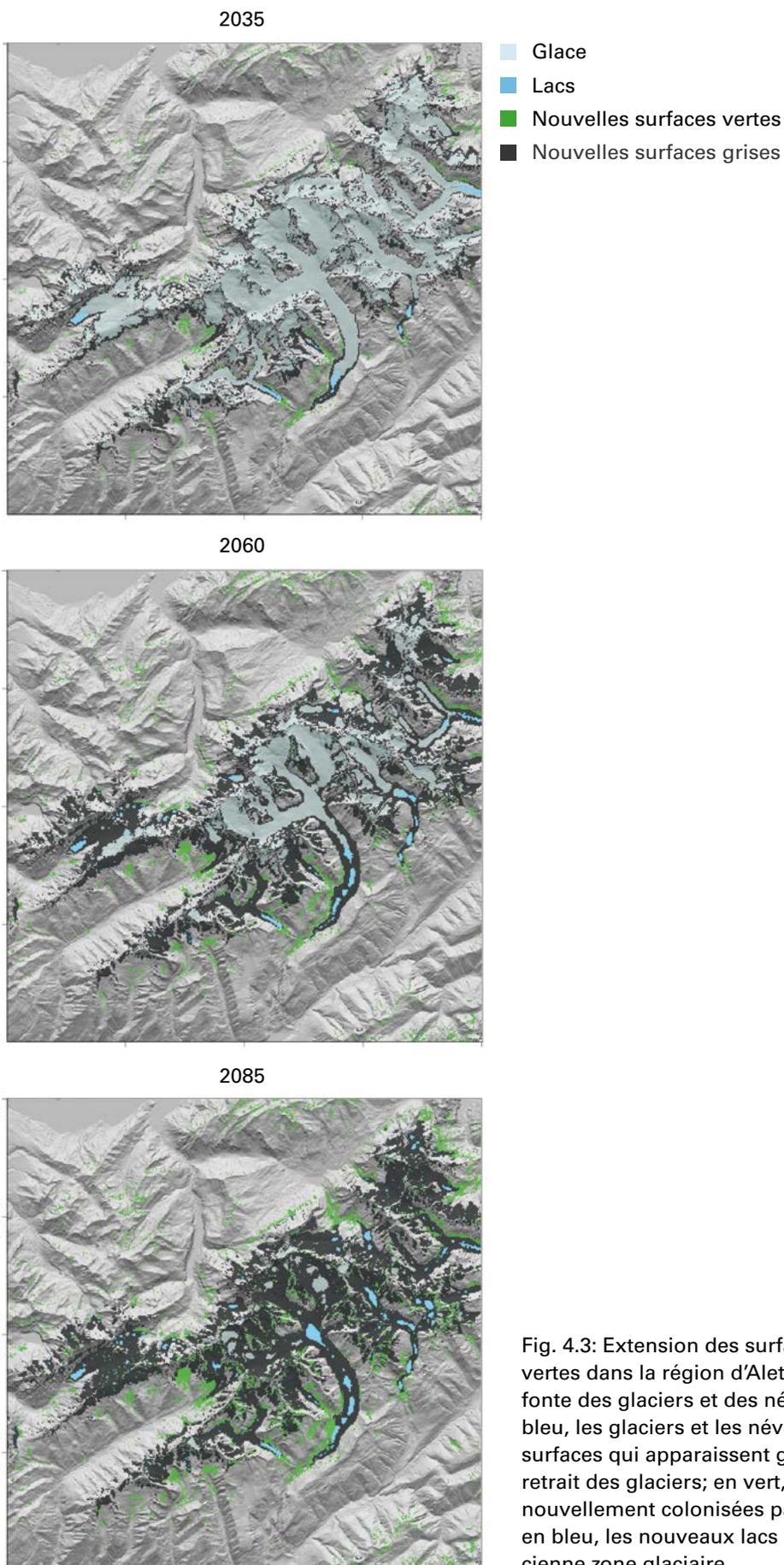


Fig. 4.3: Extension des surfaces grises ou vertes dans la région d'Aletsch après la fonte des glaciers et des névés. En gris-bleu, les glaciers et les névés; en noir, les surfaces qui apparaissent grises après le retrait des glaciers; en vert, les surfaces nouvellement colonisées par la végétation; en bleu, les nouveaux lacs créés dans l'ancienne zone glaciaire.

fur et à mesure que le climat se réchauffera vers +4 °C et plus, les sommets gris des montagnes seront colonisés par la végétation naturelle (Rumpf *et al.* 2022). Les couleurs des paysages de montagne changeront avec le changement climatique (fig. 4.3).

Le retrait des glaciers entraîne la perte d'un important réservoir d'eau pour la production d'énergie, l'agriculture, l'industrie et les ménages privés, ce qui sera particulièrement sensible dans la seconde moitié du XXI^e siècle (Davies 2022). L'utilisation des anciennes zones glaciaires, avec parfois de nouveaux lacs, aura une forte influence sur le paysage, selon que l'on construise de grands barrages, que l'on vise une utilisation combinée pour le tourisme et la production d'énergie ou que l'on permette la succession naturelle de la végétation. Le tourisme hivernal traditionnel souffrira également de la diminution significative de la couverture neigeuse (NCCS 2021b). Tant la fermeture des domaines skiables que leur extension à des altitudes plus élevées se répercuteraient dans le paysage par le biais des infrastructures. En été, le tourisme dans les régions de montagne pourra éventuellement profiter de températures plus basses que sur le Moyen Pays, à condition que l'offre soit réorientée vers un tourisme à l'année (Lanz *et al.* 2021).

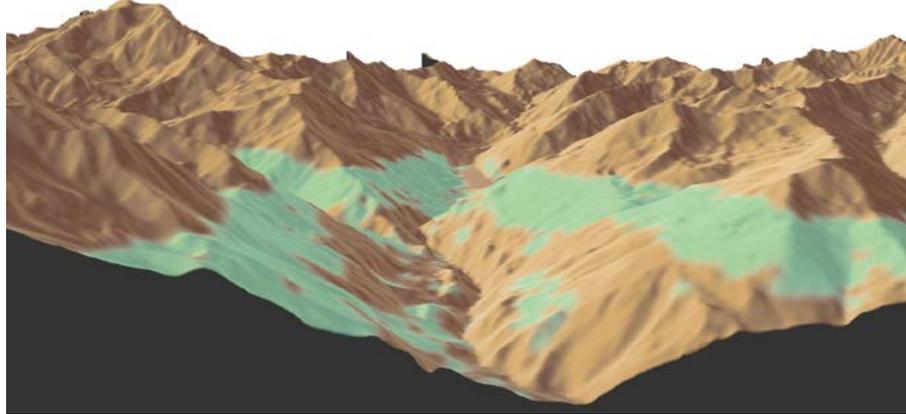
En raison du changement climatique, les risques naturels dans les régions de montagne vont également évoluer. Alors que le risque d'avalanche diminuera globalement, des précipitations intenses plus fortes et plus fréquentes et une disponibilité accrue de sédiments en raison de la fonte des glaciers et du retrait du permafrost entraîneront généralement un risque accru d'inondations, de laves torrentielles, de glissements de terrain et d'éboulements dans les régions alpines (NCCS 2021a). De tels événements peuvent modifier considérablement le paysage de montagne et, en parallèle, les mesures de protection contre ces dangers naturels auront une grande influence sur le paysage. D'imposants ouvrages de soutènement peuvent être visibles de loin. Inversement, si dans des cas extrêmes certaines vallées ne seront plus habitables, de nouvelles zones sauvages pourraient voir le jour. Dans le contexte des dangers naturels, l'adaptation des forêts de protection à l'évolution de la situation de danger sera particulièrement sensible (Bebi *et al.* 2016). Cela représente un double défi pour la sylviculture: d'une part, la fonction protectrice nécessaire des forêts change et, d'autre part, les forêts actuelles ne sont pas adaptées à un climat plus chaud de 4 °C, ce qui les rend plus vulnérables aux perturbations.

4.2.2 L'agriculture de montagne, un secteur qui façonne le paysage

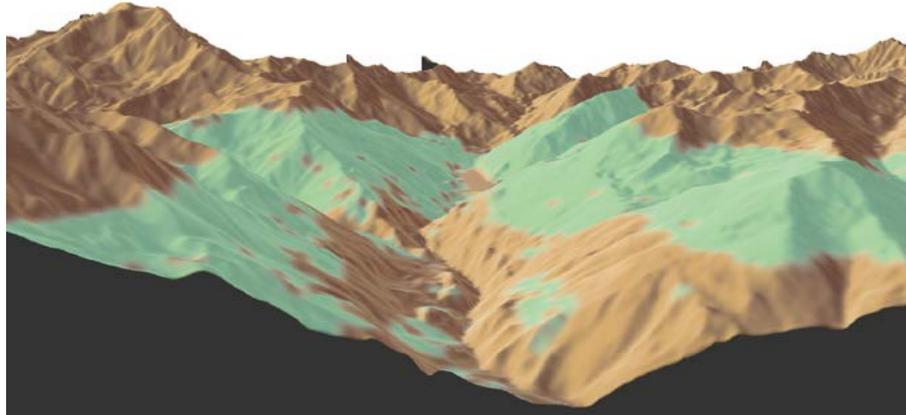
L'agriculture joue un rôle important dans les régions de montagne, y compris sur le plan paysager, en contribuant au maintien de surfaces ouvertes, comme le soulignent les spécialistes locaux. Avec la montée des limites de la végétation vers des régions plus élevées, les conditions de l'économie alpestre vont changer. Une grande partie des prairies et pâturages actuels, et mêmes des alpages, se situent en dessous de la limite actuelle de la forêt et de sa future limite. Sans fauche ou pâture, ces surfaces s'embroussailleront et, selon l'altitude, redeviendraient des forêts. Parallèlement, les pelouses alpines monteront en altitude et coloniseront des surfaces aujourd'hui dépourvues de végétation. Dans ces conditions naturelles, la manière dont ces surfaces seront utilisées à l'avenir sera déterminante pour la qualité du paysage. A cet égard, les scénarios suivants sont envisageables:

- Si l'exploitation actuelle des alpages au-dessus de la limite actuelle de la forêt est réduite ou abandonnée, des forêts de buissons et des forêts s'installeront sur ces surfaces (Gehrig-Fasel *et al.* 2007).
- Si les conditions climatiques sont mises à profit, les pâturages d'estivage pourront être aménagés à des altitudes plus élevées, au-dessus de la nouvelle limite des arbres. Cela nécessiterait un développement d'infrastructures à plus haute altitude, par exemple des routes d'alpage, des étables, des installations d'approvisionnement en eau.
- Si des systèmes sylvo-pastoraux sont mis en place sur les pâturages d'estivage actuels, un nouveau type de paysage pourrait voir le jour dans les régions de montagne. Une pâture régulière d'une intensité adaptée et une montée simultanée de la limite des arbres pourraient donner naissance à des pâturages parsemés d'arbres isolés.

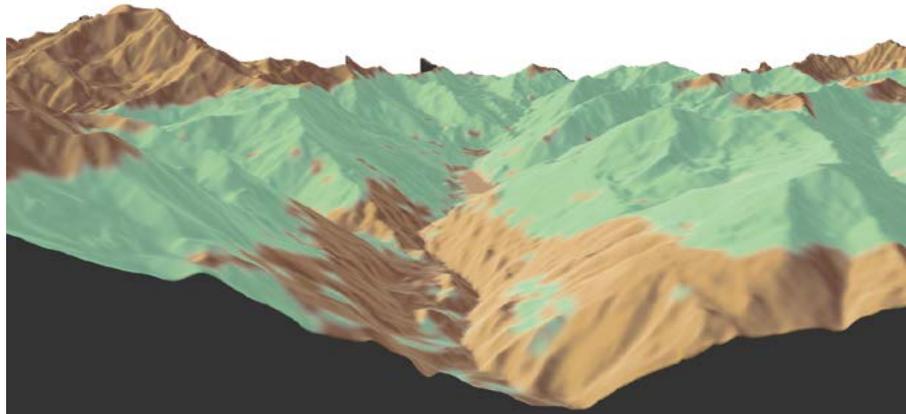
2018



2035



2060



2085

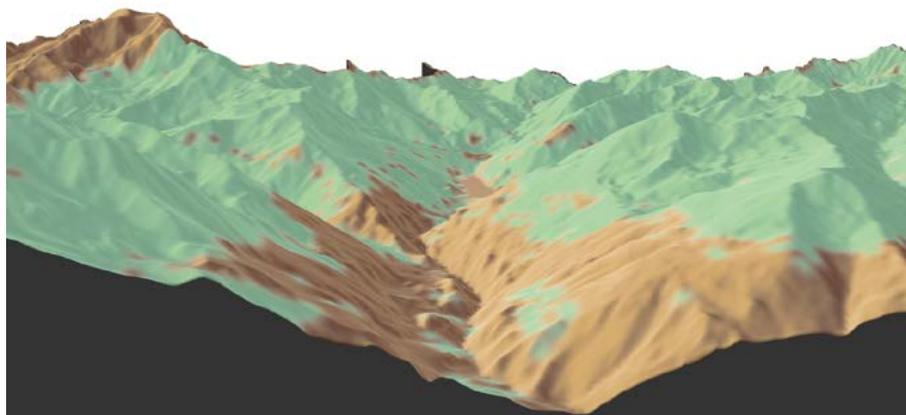


Fig. 4.4: Modélisation du potentiel de développement des pâturages boisés dans le Val de Bagnes (district d'Entremont, VS) à quatre périodes différentes (surfaces vertes). Même pour l'état actuel (2018), c'est le potentiel qui est représenté et non l'exploitation effective.

La surface sur laquelle des systèmes sylvo-pastoraux peuvent développés augmentera considérablement avec le changement climatique (fig. 4.4). Ce type d'exploitation favorise à la fois l'adaptation au changement climatique et l'atténuation de celui-ci (cf. chap. 3.2.4). Toutefois, l'extension à grande échelle de ce type de paysage dépendra des décisions prises par les exploitants.

Comme le soulignent les spécialistes de la région de l'Entremont, avec le réchauffement climatique, la gestion de l'eau deviendra un défi central pour l'agriculture de montagne afin de garantir la disponibilité de l'eau à long terme. En période de sécheresse, les besoins en irrigation des champs et des prairies de fauche augmentent et l'eau nécessaire à l'exploitation des alpages peut se faire rare. Différentes mesures d'adaptation sont envisageables pour faire face aux changements de conditions. D'une part, selon les experts locaux, les réseaux de distribution d'eau pourraient être améliorés et l'infrastructure d'irrigation développée. D'autre part, la production agricole pourrait être diversifiée par la culture de céréales plus résistantes à la sécheresse ou de produits de niche tels que les herbes aromatiques. Une période de végétation plus longue peut générer certains avantages pour l'agriculture régionale, comme une durée d'alpage plus longue aussi (Köllner *et al.* 2017). Si l'agriculture ne parvient pas à s'adapter, ou seulement sur certaines surfaces, il faut s'attendre à ce que les surfaces deviennent moins productives et embroussaillées et que les pâturages alpins soient envahis par la végétation arborée.

4.3 Modifications du paysage dans le Moyen Pays

4.3.1 Chaleur et sécheresse marquent le paysage

La chaleur deviendra un défi important pour la population du Moyen Pays, car les jours de canicule, tels qu'ils se sont produits en moyenne une fois par an entre 1981 et 2010, sont attendus en moyenne entre 10 et 29 jours par an dans le scénario climatique RCP8.5 pour le Moyen Pays (NCCS 2018). Les zones urbaines se réchaufferont davantage pendant la journée et se refroidiront plus lentement la nuit que les zones rurales environnantes: c'est l'«effet d'îlot de chaleur urbain» (Köllner *et al.* 2017). Lors des chaudes journées d'été, les rues et les places des agglomérations n'inviteront pas à la détente.

Les agglomérations pourraient toutefois être réaménagées de manière à se réchauffer moins fortement. En orientant judicieusement les bâtiments et les routes, il est possible de conserver ou de créer des corridors d'air frais pour rafraîchir les zones d'habitation (OFEV, 2018). Ces possibilités existent en premier lieu dans les nouvelles zones de construction, les lotissements et les rénovations de quartiers. Les sols non imperméabilisés peuvent absorber l'eau de pluie, notamment en cas de fortes précipitations. En période de sécheresse et de chaleur, l'eau stockée dans le sol s'évapore, ce qui contribue à rafraîchir l'environnement. Selon ce principe, les zones urbaines peuvent être transformées en villes et villages éponges (OFEV/ARE 2022). Les infrastructures dites bleues et vertes contribuent également à un microclimat agréable dans les agglomérations (OFEV 2018). Il s'agit notamment des plans d'eau ouverts et de la végétalisation des espaces publics et privés, en particulier avec des arbres qui font de l'ombre. La végétalisation des zones d'habitation doit commencer suffisamment tôt et il faut tenir compte du fait que les conditions de croissance de la végétation vont changer avec le changement climatique (cf. chap. 4.1). Comme pour le choix des essences dans les forêts, il faut choisir pour les arbres urbains des espèces capables de résister aux futures conditions climatiques dans les zones d'habitation. Le chêne hongrois ou italien (*Quercus frainetto*) ou l'arbre à gutta-percha chinois (*Eucommia ulmoides*) en sont des exemples. D'autres essences urbaines résistantes au climat sont citées par Schönfeld (2019). La mise en œuvre de ces mesures d'adaptation au changement climatique peut modifier considérablement l'aspect des agglomérations tout en augmentant l'attractivité des espaces publics, selon les spécialistes de la région du Seeland.

La sécheresse représente un autre défi majeur pour le Moyen Pays, qui aura des répercussions sur le paysage, le stress dû à la sécheresse et celui dû à la chaleur se produisant souvent ensemble. Avec un réchauffement moyen de 4°C, il faut s'attendre à ce que les mois d'été soient nettement plus secs et à ce que les jours sans pluie soient

nettement plus nombreux. Dans ce scénario climatique, il faut s'attendre à ce que la plus longue période sèche de l'été en Suisse soit jusqu'à 9 jours plus longue qu'au début du siècle, soit environ 20 jours (NCCS 2018). Les périodes de sécheresse constitueront un défi majeur, notamment pour l'agriculture et la sylviculture (Williams *et al.* 2013).

La disponibilité de l'eau sera déterminante pour le développement futur de l'agriculture. Si l'eau est disponible en quantité suffisante, l'agriculture du Moyen Pays profitera de l'allongement de la période de végétation. Sur les terres arables, il sera possible de pratiquer deux cultures successives au cours d'une même période de végétation. Les prairies pourront subir des coupes supplémentaires. Toutefois, s'il manque de l'eau pour l'irrigation, on trouvera de plus en plus de surfaces brunes avec de l'herbe sèche au lieu de prairies et de pâturages verts. Les céréales devront être récoltées plus souvent de manière précoce, éventuellement en urgence. Par conséquent, des cultures intermédiaires devront être cultivées afin de protéger le sol de l'érosion. La palette des cultures agricoles sera également modifiée en raison des sécheresses. Ainsi, les betteraves sucrières, les pommes de terre ou le maïs, qui nécessitent beaucoup d'eau, ne pourront plus guère être cultivés vers la fin du XXI^e siècle. Elles pourraient être remplacées par des cultures plus résistantes à la sécheresse, comme la patate douce ou le sorgho (Felber *et al.* 2017).

Les mesures prises dans l'agriculture pour s'adapter au changement climatique auront un impact important sur le paysage. Les surfaces irriguées seront reconnaissables comme des taches vertes dans le paysage, sur lesquelles des installations d'irrigation de grande envergure seront déployées. Avec l'avancée du changement climatique, il sera de plus en plus important de gérer l'eau avec parcimonie afin d'éviter les conflits avec l'équilibre écologique des cours d'eau et les autres utilisations de l'eau (p.ex. l'approvisionnement en eau potable). Les légumes et les baies seront de plus en plus cultivés dans des serres, car celles-ci permettent une irrigation et une fertilisation ciblées, ainsi qu'une protection contre les intempéries (p.ex. la grêle) et les parasites. Les serres de grande taille porteront toutefois atteinte à la valeur esthétique du paysage.

4.3.2 Cours d'eau: du ruissellement aux crues soudaines

Outre des périodes de sécheresse plus fréquentes, il faut s'attendre, en cas de réchauffement moyen de 4°C, à des épisodes de fortes précipitations plus fréquents et plus intenses dans toute la Suisse, ce qui entraînera des crues et des inondations plus fréquentes dans le Moyen Pays (OFEV 2021). Non seulement les dommages causés aux bâtiments, aux infrastructures et aux terres agricoles, mais aussi les mesures de protection seront visibles dans le paysage. Les hautes digues et les canaux bétonnés ne nuisent pas seulement au paysage, ils favorisent également l'érosion du lit des cours d'eau et limitent les habitats naturels (Rohde 2005). Il est donc préférable d'élargir et de renaturer les cours d'eau, non seulement pour des raisons écologiques et paysagères, mais aussi pour des raisons techniques et économiques. Comme l'ont souligné des experts régionaux, les élargissements réduisent considérablement les dommages potentiels causés par les inondations et augmentent la résilience des écosystèmes aquatiques face aux crues et aux étiages. De telles mesures sont toutefois relativement gourmandes en surface et entreront donc parfois en conflit avec d'autres utilisations du sol, comme la production agricole.

Les zones humides, c'est-à-dire les hauts-marais, les bas-marais et les paysages marécageux, ainsi que les écosystèmes qui s'y trouvent, pourront être affectés, voire détruits, par des périodes de sécheresse (Niedermair *et al.* 2011). Ces habitats vont se transformer. Si des espèces fonctionnellement similaires, mais plus résistantes à la sécheresse s'installent, certaines fonctions et services écosystémiques pourront être préservés. Avec le scénario climatique RCP 8.5 que nous avons utilisé pour nos modélisations et en l'absence de mesures de protection pour les marais, cela est peu probable (Graf *et al.* 2021). La disparition des zones humides entraînera une diminution de la diversité paysagère et biologique.

5 Des récits sur les paysages face au changement climatique

Dans ce chapitre, nous vous emmenons en randonnée à travers deux paysages typiques de la Suisse, l'un dans le Moyen Pays et l'autre dans l'espace alpin. Elles ne traversent pas des paysages actuels, mais des paysages tels qu'ils pourraient apparaître en cas de réchauffement moyen de 4°C. Avec un réchauffement climatique de 4°C, le paysage se modifiera sensiblement en Suisse. Toutefois, les paysages évolueront différemment selon que nous prenons ou non dès aujourd'hui des dispositions pour nous adapter au changement climatique. C'est pourquoi nous découvrirons quelques sections de paysages au cours de la randonnée, selon deux variantes. Dans la première variante, nous visiterons un paysage dans lequel la politique et la société n'ont pas anticipé leur comportement face aux effets du changement climatique, mais réagissent passivement à ces effets. Dans la deuxième variante, nous découvrons un paysage qui pourrait se présenter si la politique et la société modifiaient leur comportement face au changement climatique de la manière la plus prévoyante possible et faisaient face aux impacts par des stratégies d'adaptation actives et des mesures associées.

Avant de pouvoir nous mettre en route, nous devons effectuer un voyage dans le temps jusqu'en 2085. Un avertissement: la machine à voyager dans le temps nous emmène dans un monde où le changement climatique est déjà bien avancé, mais elle ne connaît pas les autres changements qui pourraient avoir lieu d'ici à 2085. Il s'agit par exemple des moyens de transport que les gens utiliseront en 2085 pour se rendre d'un point A à un point B, des vêtements qu'ils porteront, de la manière dont ils communiqueront entre eux ou des lois en vigueur. C'est pourquoi la randonnée se concentre exclusivement sur les changements de paysage induits par le changement climatique et l'adaptation humaine à ce dernier. Après tout, cela permettra de ne pas être complètement démodés avec notre équipement de randonnée de 2023.

5.1 Une randonnée dans le Seeland en 2085

Le paysage du Seeland se caractérise aujourd'hui par une agriculture intensive ainsi que par des lacs et des rivières qui structurent le paysage. Les villages et les villes dans lesquels les gens vivent et travaillent sont également très visibles, tout comme les infrastructures qui y sont associées, telles que les routes, les voies ferrées ou les terrains de football. Souvent, le mot Seeland évoque des images d'un paysage très plat, mais des régions vallonnées font également partie du Seeland. Ces collines sont souvent couvertes de forêts.

Nous commençons maintenant notre voyage dans le temps en 2085, année plus chaude de 4°C en moyenne. À la fin du XXI^e siècle, les mois de juin, juillet et août sont nettement plus secs. Certes, il tombe autant de précipitations en un jour de pluie qu'au début du siècle, mais les jours sans pluie sont plus fréquents. La plus longue période de sécheresse estivale en Suisse à la fin du XXI^e siècle est jusqu'à 9 jours plus longue qu'au début du siècle, soit environ 20 jours. Les périodes de sécheresse, qui se produisaient en moyenne tous les 10 ans entre 1981 et 2010, se produisent en moyenne une année sur deux à la fin du XXI^e siècle. Il tombe en moyenne 24% de pluie en moins pendant les mois d'été. Malgré l'augmentation de la sécheresse, des épisodes de précipitations extrêmes se produisent également à la fin du siècle. Les plus fortes précipitations annuelles d'un jour sont en moyenne 4% plus élevée qu'au début du siècle. Un événement pluvieux très rare, qui se produit environ une fois tous les 100 ans, est en moyenne 12% plus intense. Malgré la diminution des précipitations totales en été, certains événements pluvieux sont donc plus forts et peuvent avoir des conséquences financières importantes. Parallèlement, la température de l'air au niveau du sol est en moyenne de 4°C à 7°C plus chaude durant les mois d'été (juin, juillet et août) que durant la période 1981–2010. Le jour le plus chaud de l'année est de 3,9 à 9,5°C plus chaud qu'actuellement (NCCS 2018a; NCCS 2018b). Dans le Seeland, la température moyenne en juillet passera d'environ 19°C durant la période 1981–2010 à 26°C et le jour le plus chaud pourra dépasser 45°C (RAOnline 2023).

Le paysage actuel**Le paysage futur en cas d'adaptation lente et réactive au changement climatique****Le paysage futur dans le cadre d'une adaptation proactive au changement climatique**

Fig. 5.1: Extraits des photos panoramiques à 360° montrant trois états possibles d'un paysage fictif dans le Moyen Pays. Elles se réfèrent aux descriptions des zones d'habitat, des terrains agricoles et du paysage fluvial. Les images sont des photomontages inspirés par le paysage du Seeland. © Ikonaut GmbH

5.1.1 Une zone d'habitat dense

Notre excursion commence à la gare d'une ville de taille moyenne. La ville est située à environ 500 mètres d'altitude. Il fait chaud et il n'a pas plu depuis plus de deux semaines. Nous traversons la place de la gare, le soleil cogne et la chaleur s'accumule entre les bâtiments. Dans les zones densément construites, il fait encore quelques degrés de plus que dans les environs.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Nous faisons partie des rares personnes qui traversent la ville à pied. La plupart des gens sortent le moins possible lorsqu'il fait chaud comme aujourd'hui, réduisent les trajets nécessaires en ville et passent le plus de temps possible dans des habitations et des bureaux climatisés. Les caissons de nombreux climatiseurs sont visibles et audibles sur les façades des bâtiments, car presque chaque appartement et chaque bureau est désormais climatisé. Depuis les années 2020, la ville s'est étendue en surface et en hauteur, mais sa structure de base est restée largement la même. Nous passons à côté d'un grand chantier où le système de canalisations souterraines d'un ruisseau est en cours de révision afin de pouvoir absorber de plus grandes quantités d'eau. Malgré cela, les caves sont régulièrement inondées dans certains quartiers.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Nous sommes heureux que les rues soient couvertes d'arbres produisant de l'ombre, d'arbustes et d'herbe, car cela rend la chaleur plus supportable. Dès les années 2020, le service des parcs et jardins de la ville a commencé à promouvoir des plantes résistantes à la chaleur et à la sécheresse dans la ville. Il est frappant de constater que les lotissements et les rues construits au cours des soixante dernières années sont orientés différemment dans le paysage urbain que les précédents. Cela s'explique par le fait que depuis les années 2020, l'aménagement du territoire veille à préserver les corridors d'air froid pour rafraîchir la ville pendant les journées chaudes. Malgré tout, il fait une chaleur étouffante. Nous traversons un ruisseau et ressentons aussitôt un courant d'air frais. En 2023, le ruisseau était encore souterrain. Aujourd'hui, il est entouré d'arbres et de buissons, les rives sont facilement accessibles et des enfants jouent dans l'eau peu profonde.

Nous arrivons dans un quartier avec une zone de rencontre publique qui est à nouveau plantée d'arbres et dont le sol n'est pas asphalté, mais recouvert de gravier. Ainsi, les fortes pluies, devenues plus fréquentes, peuvent pénétrer plus facilement dans le sol et l'eau ne s'écoule pas exclusivement en surface jusqu'à la bouche d'égout la plus proche. En cas de fortes pluies, la galerie de décharge souterraine est également utilisée pour éviter que trop d'eau provenant des zones environnantes ne s'écoule à travers la ville.

Sur notre gauche, nous voyons un immeuble de bureaux. Son toit et sa façade sont végétalisés et il offre des postes de travail ombragés sur plusieurs balcons et terrasses, comme alternative aux bureaux à l'intérieur. La plupart des immeubles d'habitation voisins ont également des façades et des toits végétalisés, qui assurent un climat intérieur plus agréable et réduisent les besoins en énergie pour la climatisation. Tous les nouveaux bâtiments sont soumis à des règles strictes en matière d'isolation thermique, car une bonne isolation permet de réduire encore les besoins en énergie pour la climatisation.

5.1.2 Le paysage agricole

Nous montons dans un bus et sortons de la ville. Le bus atteint la périphérie de la ville et la zone urbanisée se transforme en zone agricole. Les rendements agricoles ont eu tendance à augmenter durant la première moitié du XXI^e siècle, car les cultures ont profité de températures plus élevées et de périodes de végétation plus longues, et les dommages causés par le gel, par exemple aux arbres fruitiers et aux vignobles, sont

devenus globalement plus rares, bien que le risque de gelées tardives ait augmenté en raison du démarrage plus précoce de la végétation. Mais depuis le milieu du XXI^e siècle, les effets négatifs de la sécheresse et de la chaleur ont pris le pas sur les effets positifs. On assiste régulièrement à des périodes de sécheresse prolongées et à des étés caniculaires au cours desquels une grande partie des récoltes est perdue parce que les champs se dessèchent ou les cultures ne résistent pas au stress thermique. Par exemple, les céréales sont de plus en plus souvent récoltées en urgence et l'élevage des animaux est plus exigeant. Lors de la sécheresse du siècle l'été dernier, de nombreuses récoltes ont été perdues parce que l'irrigation n'a pas pu être assurée. Même sans prélèvements supplémentaires pour l'irrigation, de nombreux écosystèmes aquatiques ont été endommagés, des poissons sont morts et des ruisseaux se sont asséchés. Les récoltes se sont atrophiées et les champs sont devenus bruns et craquelés.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

En regardant par la fenêtre du bus, nous voyons un paysage agricole plein de contrastes. Dans la plaine, certaines surfaces sont équipées de systèmes d'irrigation permanents, où les cultures sont irriguées de manière contrôlée, précise et pendant toute la période de végétation. Ces surfaces se distinguent dans le paysage par leur vert éclatant. Toutefois, tous les champs, prairies et cultures nécessitant une irrigation sont loin d'être irrigués, car il n'existe guère de méthodes efficaces de stockage et de distribution de l'eau coordonnées au niveau régional et les eaux de surface ont souvent un faible niveau d'eau, ce qui empêche tout prélèvement. De nombreuses terres de plaine sont considérées comme des terres agricoles prioritaires et peuvent donc être irriguées. Les champs situés sur les collines et ceux qui sont plus éloignés des cours d'eau et des canaux ne peuvent généralement pas être irrigués. Ces champs présentent des signes de désertification, avec des zones sèches sans végétation et la formation de poussière. Le vent et l'eau ont fortement érodé la couche supérieure du sol et de nombreux nutriments ont été lessivés. Sur les surfaces désertifiées, on trouve encore quelques arbres qui ont survécu aux périodes de sécheresse et dans certains champs, le bétail peut sortir. Pour protéger les animaux de la chaleur, des voiles d'ombrage ont été installés.

Nous descendons à un arrêt sur la route de campagne et, dans un premier temps, nous ne voyons plus rien car un tracteur soulève de grandes quantités de poussière à proximité. Le tracteur pulvérise des produits phytosanitaires sur un champ. De nombreux ravageurs profitent des conditions plus chaudes et de nouveaux organismes nuisibles ont pu entre-temps migrer au-delà de la crête des Alpes. Les champignons et les insectes peuvent causer des dégâts considérables, raison pour laquelle la protection phytosanitaire a encore gagné en importance dans l'agriculture.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

En regardant par la fenêtre du bus, nous voyons dans la plaine le motif géométrique typique des différents champs qui se succèdent. Devant la fenêtre défilent des champs dans les tons brun-jaune. Il s'agit de céréales résistantes à la sécheresse. De plus en plus de cultures doivent aujourd'hui être irriguées de manière régulière et intensive. Nous voyons des surfaces équipées de systèmes d'irrigation permanents. Les cultures y sont irriguées de manière contrôlée et précise pendant toute la période de végétation. Les surfaces irriguées apparaissent toujours d'un vert frais et l'irrigation garantit que les cultures telles que les pommes de terre puissent encore être cultivées. Les champs irrigués sont situés le plus près possible des rivières, des canaux et des lacs afin que l'irrigation puisse se faire avec le moins d'effort possible. Les systèmes d'irrigation et de drainage sont coordonnés au niveau régional, ce qui permet une répartition aussi équitable que possible de l'eau qui s'est faite rare.

Nous descendons à un arrêt sur la route de campagne et, dans un premier temps, nous ne voyons plus rien, car un tracteur roule sur la route non goudronnée en soulevant de grandes quantités de poussière. Une fois la poussière retombée, nous regar-

dons en direction d'une ferme et voyons un bassin de stockage couvert pour l'eau de pluie. Ce bassin permet à l'exploitation agricole de surmonter les pénuries d'eau d'irrigation de courte durée.

Nous passons devant la ferme et voyons une grande surface de longs tunnels en plastique et de serres dont les toits sont recouverts par bandes de panneaux solaires. De telles constructions sont nettement plus fréquentes dans le paysage que dans les années 2020, car les cultures y sont mieux protégées contre les événements extrêmes devenus plus fréquents, comme la sécheresse, les attaques de parasites ou les fortes précipitations. De plus, il est plus facile de contrôler les conditions à l'intérieur qu'en plein champ. De nombreuses serres ressemblent à des bâtiments industriels. On y pratique une agriculture verticale, à la pointe de la technologie. Les bâtiments sont parfois hauts de plusieurs étages et nous avons ici plus l'impression de nous trouver dans un quartier industriel que dans un paysage agricole. Dans de telles installations, la production, le conditionnement et la distribution peuvent se faire à proximité les uns des autres, ce qui réduit les distances de transport. Nous continuons notre chemin le long des serres sur notre gauche.

Sur notre droite, l'image est contrastée. Ici, on pratique l'agroforesterie, une méthode de culture qui associe les cultures ou les légumes aux arbres. Dans le champ devant nous, les céréales poussent à l'ombre de pommiers à haute tige. Les arbres fruitiers retiennent en outre l'humidité. Les cultures sont ainsi mieux armées contre la sécheresse et les pommes peuvent être récoltées et vendues en plus. Le paysage devient également plus attrayant grâce aux arbres.

La plupart des exploitations utilisent des variétés nouvellement sélectionnées, mieux adaptées à l'évolution des conditions climatiques. Dans le paysage, elles ne se distinguent guère des variétés traditionnelles. Mais il existe aussi des champs dont les cultures n'existaient pas en Suisse auparavant, comme le champ de quinoa que nous avons atteint entre-temps. Ce champ vert et rougeâtre élargit la palette de couleurs des surfaces agricoles. Les cultures provenant du bassin méditerranéen, comme les melons ou les aubergines, font désormais aussi partie du cycle normal de culture.

Nous suivons un chemin de randonnée qui nous fait passer de la plaine à une colline. Là, nous atteignons la ferme suivante. Elle est spécialisée dans l'élevage et se compose d'étables spacieuses, hautes et bien aérées, de sorte que les animaux puissent profiter de conditions aussi fraîches que possible au sol. C'est l'heure de midi, le troupeau de vaches se trouve dans l'étable et non dans le pâturage avec ses nombreux arbres qui lui font de l'ombre. Les pâturages à proximité des étables sont couverts d'herbe séchée. Manifestement, les animaux se déplacent certes à l'extérieur, mais ne broutent que très peu et sont nourris de manière complémentaire.

Nous passons devant un champ qui a déjà été récolté parce qu'il devait être planté cette année avec deux cultures principales. Cela permettrait d'augmenter les rendements. Mais le champ a été affecté par les fortes pluies qui ont précédé la période de sécheresse actuelle. Il était alors fraîchement semé et donc à peine recouvert par la végétation, ce qui le laissait largement exposé à l'érosion. En raison de la pente, l'eau qui s'est écoulée a emporté une grande partie de la terre végétale et a laissé un réseau de ravines dans le champ. Ce n'était pas de chance, car les champs situés sur des collines sont en principe recouverts de végétation en permanence pour les protéger de l'érosion de surface en cas de fortes pluies.

En se promenant dans le paysage agricole, nous constatons qu'entre les différentes cultures, il y a beaucoup de haies, d'arbres et de bandes fleuries qui ont été installés pour protéger du vent, créer de l'ombre et pour favoriser les insectes utiles et la biodiversité. Les sous-semis offrent également un habitat aux insectes utiles. De nombreux ravageurs profitent des conditions plus chaudes et de nouveaux organismes nuisibles ont entre-temps pu migrer au-delà de la crête des Alpes, ce qui explique l'importance accrue de la lutte contre les ravageurs dans l'agriculture. Pour ne pas devoir utiliser toujours plus de produits phytosanitaires, les serres ainsi que les bandes fleuries et les éléments paysagers favorisant les insectes utiles jouent un rôle important. Nous arrivons à la périphérie du village et voyons une installation solaire sur une prairie où paissent des moutons. Les moutons se sont retirés à l'ombre des panneaux pour mieux supporter la chaleur de midi.

Les différentes exploitations agricoles ont fait face à l'évolution des conditions climatiques en adoptant des stratégies différentes, ce qui a permis d'une part de diversifier le paysage et d'autre part d'augmenter la résilience de l'ensemble de la production agricole face aux perturbations.

5.1.3 Le paysage fluvial

Nous traversons un petit village et arrivons par un chemin de terre sur la rive d'une rivière de taille moyenne. Le débit de la rivière est faible et le bas niveau d'eau fait ressembler la rivière plutôt à un grand ruisseau. On voit au bord de la rivière le lit à ciel ouvert. Cela est dû d'une part à la période de sécheresse persistante et d'autre part au manque d'apports en provenance des glaciers qui alimentaient autrefois les rivières en Suisse pendant les mois d'été. Nous passons devant une centrale au fil de l'eau qui produit de l'électricité. Actuellement, elle n'est pas en service car le niveau de la rivière est trop bas. Il arrive souvent que tous les besoins en matière d'utilisation de l'eau ne soient pas satisfaits en raison des débits trop faibles. Plus loin, nous arrivons à une station d'épuration. Les situations d'étiage et les températures élevées de l'eau peuvent entraîner une concentration de la pollution dans les cours d'eau. De plus, les fortes précipitations plus fréquentes lessivent davantage de polluants des régions environnantes et les amènent dans les cours d'eau. Ces substances entraînées peuvent nuire à l'écosystème aquatique, raison pour laquelle on investit nettement plus de ressources dans l'épuration et le traitement de l'eau qu'au début du siècle.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Dans un lit canalisé, la rivière suit aujourd'hui encore un cours très similaire à celui qu'elle avait dans les années 2020. Nous marchons sur un chemin de gravier sur une berge artificiellement consolidée, destinée à maintenir la rivière dans son lit en cas de crue. La sécheresse et la chaleur persistantes ont déséquilibré l'écosystème aquatique. Des poissons morts gisent sur le lit asséché de la rivière qui semble peu vivant et ça sent mauvais. Nous traversons un ruisseau affluent qui est complètement asséché. En Suisse, l'assèchement sporadique des ruisseaux a entraîné l'extinction de nombreuses espèces animales et végétales qui n'ont pas pu se déplacer vers des eaux plus fraîches et tendentiellement plus élevées. En cas de crue, les berges consolidées peuvent supporter un débit important, mais en cas d'événements extrêmes, les champs et les zones d'habitat environnantes sont menacés d'inondation.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Nous empruntons un chemin sinueux à travers une forêt alluviale qui sert de plaine d'inondation à la rivière. Celle-ci a été renaturée dans la première moitié du siècle, ce qui a contribué à améliorer la résistance et la capacité d'adaptation de l'écosystème aquatique aux conditions climatiques modifiées. Aujourd'hui, la rivière s'écoule dans de petits rubans boisés et non plus dans un fossé rectiligne en surface, comme c'était le cas auparavant. Le boisement fournit de l'ombre et contribue à maintenir la température de l'eau plus fraîche, ce qui est essentiel à la survie de certaines espèces végétales et animales. Des chants d'oiseaux et des bruissements d'animaux sont audibles. La revitalisation a permis aux animaux de trouver davantage d'abris, grâce aux variations de profondeur de l'eau. Les ruisseaux affluents ont également été renaturés et boisés, ce qui a permis à certaines espèces de se déplacer vers de nouvelles zones de répartition plus élevées. Lors des crues, qui sont devenues plus fréquentes, la forêt alluviale peut être inondée et les sédiments entraînés. Les alluvions peuvent être déposées sans que les infrastructures, les champs et les habitations ne soient menacés. Le tracé tressé de

la rivière offre des refuges aux organismes aquatiques en cas de crue.

Sur la rive, nous rencontrons plusieurs familles sur des aires de pique-nique, qui se reposent à l'ombre ou cherchent à se rafraîchir dans l'eau peu profonde.

Sur notre chemin, nous rencontrons régulièrement, le long de la rivière, des endroits recouverts d'une plante à fleurs roses. Cette touche de couleur est certes belle, mais elle pose problème, car la plante est fortement invasive et, en raison des changements climatiques, elle est mieux adaptée aux conditions actuelles que d'autres espèces indigènes. Les autorités ont donc pris des mesures pour freiner la propagation de la plante.

5.1.4 Une commune rurale centrale

Le paysage autour de nous est de plus en plus marqué par les habitations et nous arrivons finalement dans une commune rurale au bord d'un lac. En traversant le village, nous voyons plusieurs bâtiments protégés contre les inondations par des mesures de protection d'objets, telles que des murs en béton à hauteur de hanche le long du jardin ou des sauts de loup pouvant être recouverts de manière étanche en cas de crue. Depuis que les crues locales sont plus fréquentes en Suisse, la protection contre les inondations dans les zones d'habitation revêt une plus grande importance. Ainsi, le ruisseau traversant le village s'écoule dans un chenal large et profond qui pourrait paraître surdimensionné en cette période d'étiage, avec de hautes digues pour que les bâtiments environnants soient le mieux protégés possible en cas de crue. Nous regardons par-dessus le lac vers une commune située sur l'autre rive.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Au cours des dernières décennies, le village situé sur l'autre rive a régulièrement fait la une des médias en raison de plusieurs laves torrentielles qui se sont déclenchées sur le versant en amont du village et qui ont causé des ravages dans la zone habitée. Avec le changement climatique, de tels événements sont devenus plus fréquents et plus intenses, ce qui a entraîné une augmentation des dommages.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Le village situé sur l'autre rive a écarté de manière exemplaire le danger lié aux torrents et laves torrentielles. Comme dans d'autres communes, des mesures strictes d'aménagement du territoire y sont appliquées, comme des interdictions de construire et des prescriptions pour la protection d'objets. Grâce à ces mesures, le potentiel de dommages n'a pas augmenté avec le changement des conditions climatiques et l'augmentation des risques. En revanche, il a fallu renoncer à construire à certains endroits.

Nous nous promenons jusqu'à la plage du lac pour nous rafraîchir. Mais une fois sur place, nous constatons que la baignade est interdite dans le lac à cause des cyanobactéries qui profitent des températures élevées. Nous passons devant une station de traitement de l'eau, où l'eau du lac est traitée de manière à atteindre la qualité de l'eau potable. L'installation joue un rôle important dans l'approvisionnement en eau potable des communes environnantes et a donc été équipée dès sa construction d'un système efficace de protection contre les dommages causés par les moules quagga, car celles-ci ont également profité de la hausse des températures de l'eau et se sont fortement multipliées.

Le paysage actuel**Le paysage futur en cas d'adaptation lente et réactive au changement climatique****Le paysage futur dans le cadre d'une adaptation proactive au changement climatique**

Fig. 5.2: Extraits des photos panoramiques à 360° montrant trois états possibles d'un paysage fictif dans le Moyen Pays. Elles se réfèrent aux descriptions du paysage agricole, de la zone humide et de la forêt. Les images sont des photomontages inspirés par le paysage du Seeland.
© Ikonaut GmbH

5.1.5 Une zone humide

Nous avons un peu de temps pour visiter la zone humide à l'embouchure du fleuve. Le niveau bas de la rivière et du lac la font paraître plus sèche que nous le pensions. La grande résilience de cet écosystème et un entretien important ont cependant permis de remplacer des espèces disparues par des espèces fonctionnellement similaires, ce qui fait que la zone humide peut encore être perçue comme une zone vivante et riche en espèces.

5.1.6 La forêt

Le chemin nous fait sortir de la zone humide et monter vers la forêt communale sur le versant au-dessus du village.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

En traversant la forêt, on remarque toujours de grandes surfaces sans arbres. La forêt est certes verte ici aussi, car les arbustes et les jeunes arbres couvrent le sol, mais les arbres adultes sont absents et la forêt ressemble plutôt à une surface de buissons. Comme la canopée est absente, il fait plus chaud ici que dans le reste de la forêt. Même là où la forêt semble saine, des arbres isolés semblent malades. La mortalité croissante des arbres concerne particulièrement les épicéas, les sapins et les hêtres. Les hêtres et les épicéas sont depuis longtemps les essences principales de nombreuses forêts du Moyen Pays. C'est également le cas dans cette forêt. Comme leur aire de répartition optimale s'est déplacée vers des altitudes nettement plus élevées avec le changement climatique et qu'ils souffrent du stress dû aux sécheresses et à la chaleur qui ont augmenté dans le Moyen Pays, la forêt n'a pas l'air saine dans son ensemble. Elle souffre du dépérissement des principales essences, car on a négligé de les remplacer par des espèces résistantes à la chaleur et à la sécheresse au cours de la première moitié du XXI^e siècle. Nous trouvons néanmoins encore quelques arbres sains dans la forêt. Ce sont surtout des feuillus, comme les chênes, qui prospèrent. On ne voit plus guère de conifères sains. Nous continuons à nous enfoncer dans la forêt et atteignons, sur un versant exposé, un endroit qui a dû être en grande partie défriché récemment en raison d'une forte infestation de parasites, afin d'éviter autant que possible que le reste de la forêt ne soit touché. Les travaux de déblaiement ne sont pas encore terminés et c'est pourquoi nous ne pouvons pas prendre le chemin initialement prévu, mais devons faire un détour. Nous traversons une forêt basse clairsemée, qui n'a rien à voir avec les forêts denses et fermées des années 2020. Comme la forêt est plus dénudée, moins verte et très endommagée par endroits, les gens vont moins volontiers dans la forêt pour se détendre qu'auparavant. Même de loin, la forêt a l'air modifiée, car les zones dénudées sont visibles de loin. Nous sommes dépassés par un camion qui transporte les troncs d'arbres infestés de parasites. Ceux-ci ne peuvent plus être vendus au prix du marché, mais seulement comme bois de chauffage de deuxième classe.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

La forêt dans laquelle nous entrons semble, à première vue, ne pas avoir été modifiée par le changement climatique. En y regardant de plus près, nous constatons que la forêt présente une grande diversité de structures horizontales et verticales. Cela signifie que les essences sont très mélangées et que les arbres hauts et moins hauts se mélangent. En effet, il arrive souvent que des perturbations telles que des sécheresses ou des attaques de parasites n'affectent qu'une seule espèce ou une seule classe de taille d'arbres, tandis que les autres arbres résistent. Les peuplements multi-espèces ne sont pas seulement plus résistants aux perturbations, ils se remettent aussi plus rapidement. Nous voyons quelques arbres malades ou même morts, mais dans l'ensemble, la forêt semble dense et saine. Nous constatons que l'on ne trouve presque plus d'épicéas et de hêtres dans la forêt. Il y a plusieurs décennies déjà, des espèces d'arbres résilientes au climat actuel de cette station forestière, caractérisé par des périodes de sécheresse plus longues, ont

étés identifiées. Ces espèces ont reçu un soutien ciblé et le peuplement arboré a ainsi été transformé en une forêt mixte robuste. On y voit par exemple davantage de chênes, de tilleuls, de noyers, de pins sylvestres, d'érables à feuilles de viorne et d'érables champêtres, et la proportion de conifères est nettement plus faible qu'au début du siècle. Cela est visible de loin à d'autres périodes de l'année, car la forêt se pare de tons verts plus clairs au printemps et de couleurs vives en automne. En hiver, la forêt n'est plus verte qu'à certains endroits isolés. Des systèmes d'alerte précoce permettent de s'assurer qu'une attaque de parasites peut être détectée et freinée le plus tôt possible, ce qui contribue à la santé de la forêt dans son ensemble. Nous sommes dépassés par un camion qui transporte des troncs d'arbres abattus en vue de leur transformation. Afin de maintenir au mieux la rentabilité de la production de bois, la durée de rotation ainsi que le diamètre cible des arbres ont été réduits afin de diminuer la proportion de peuplements sensibles aux perturbations. Nous arrivons à une portion de forêt qui sert exclusivement à la production de bois et qui a donc le caractère d'une plantation et est bien desservie.

5.1.7 Près de la tour d'observation

Au point le plus élevé de la forêt, nous atteignons une tour d'observation et y grimpons. De là-haut, nous profitons d'une vue panoramique sur la forêt, les villages environnants, le lac, les terres agricoles alentour ainsi que les collines à proximité et les montagnes à l'horizon. Sur la colline opposée, nous voyons une forêt dont la moitié a brûlé. On peut voir une surface noire avec des troncs d'arbres carbonisés isolés qui s'élèvent. Cet été encore, le risque d'incendie de forêt est très élevé en raison de la sécheresse persistante dans une grande partie de la Suisse et les feux sont interdits presque partout. Bien que les entreprises forestières évacuent rapidement les branches combustibles ou les broient afin qu'elles se décomposent rapidement, des erreurs humaines et des conditions de vent défavorables provoquent régulièrement des incendies de forêt dont les traces sont visibles dans le paysage pendant de nombreuses années. Nous regardons en direction du Jura et voyons sur une colline l'un des parcs éoliens de la région. Dans les années 2020, la colline était encore entièrement boisée, mais après que tout le versant sud a brûlé et que la couche d'humus a ensuite été emportée lors d'un épisode de fortes précipitations, la forêt n'a plus repoussé. Le site n'est plus apte à être boisé et est depuis lors utilisé pour la production d'énergie. Dans l'autre direction, nous voyons les Alpes au loin. De nombreuses montagnes, autrefois recouvertes de neige, en sont aujourd'hui dépourvues et le panorama est dominé par le gris et non plus par le blanc. Le reste du paysage a également changé de couleur. En raison des sécheresses persistantes, les tons bruns et jaunes dominent dans le paysage, tandis que les tons de vert sont surtout présents à proximité des cours d'eau, sur les terres irriguées et dans les forêts.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

En regardant vers le prochain village, nous voyons quelques voitures circuler dans les rues, mais pas de piétons ni de cyclistes. En dehors du village, des nuages de poussière recouvrent les champs bruns et desséchés. Les surfaces irriguées se distinguent nettement.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

En regardant vers le prochain village, nous constatons la présence de beaucoup de verdure sur les bâtiments et dans les espaces publics. De là-haut, nous voyons également les nombreux tunnels en plastique et les serres dans la plaine que nous avons traversée.

Nous descendons de la tour et, sous le soleil couchant, nous prenons le chemin du retour vers 2023.

5.2 Une randonnée dans l'Entremont en 2085

Les vallées alpines, entourées de part et d'autre de hautes montagnes, sont caractéristiques du paysage de l'Entremont. Les vallées abritent généralement de petits villages et quelques villages de taille moyenne, parfois avec des stations de ski. Là où le terrain n'est pas trop abrupt et rocheux, les versants sont boisés. L'agriculture consiste princi-

Le paysage actuel



Le paysage futur en cas d'adaptation lente et réactive au changement climatique



Le paysage futur dans le cadre d'une adaptation proactive au changement climatique



Fig. 5.3: Extraits des photos panoramiques à 360° montrant trois états possibles d'un paysage dans une région de montagne. Elles se réfèrent aux descriptions concernant le village, la rivière et la forêt. Les images sont la combinaison de deux photographies de la région de l'Entremont. © Ikonaut GmbH

palement en l'exploitation des pâturages. Tant les rivières principales dans les vallées que les nombreux affluents qui descendent des versants marquent les vallées de leur empreinte. Les montagnes environnantes dépassent parfois les 3000 mètres d'altitude, ce qui explique que le paysage y soit hautement alpin. On y trouve surtout des rochers, des glaciers et des éboulis.

5.2.1 Un village de montagne

Nous repartons maintenant pour l'année 2085, où il fait en moyenne 4°C de plus qu'actuellement. Notre promenade commence à l'arrêt de bus « École » dans un petit village de montagne. Il est situé à environ 1600 m d'altitude, un peu au-dessus du fond de la vallée, sur le versant ensoleillé, et est flanqué des deux côtés de la vallée par des montagnes de 2000 à 4000 m d'altitude. La vallée est traversée par une rivière de montagne. Il fait chaud et il n'a pas plu depuis plus de deux semaines.

Nous nous promenons le long de la rue du village, rarement fréquentée. Le village est composé de nombreuses habitations individuelles, pour la plupart assez petites. Les grands immeubles sont absents.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Tant le tourisme d'hiver que le tourisme d'été ont souffert dans la région. En hiver, l'atmosphère hivernale attractive par le passé fait maintenant défaut, car la neige est souvent absente et les pluies sont nettement plus fréquentes qu'au début du siècle. Autrefois, le village exploitait une petite station de ski et les sports d'hiver constituaient une composante importante de la vie locale. Mais dans les années 2030, elle a été fermée par manque de neige et les remontées mécaniques ont été démontées. Cela a non seulement déçu la population du village, mais a aussi réduit le nombre de touristes dans la région et le secteur du tourisme ne génère presque plus de revenus en hiver. En été aussi, certaines maisons sont inoccupées et les magasins et restaurants ont fermé depuis longtemps. Dans le village, peu de nouvelles offres touristiques ont été créées pour augmenter l'attractivité de la région. C'est pourquoi le nombre d'emplois dans le village a diminué. En été, il fait certes plus frais dans l'Entremont que dans le Moyen Pays, mais il y fait tout de même chaud et très sec. Sur de nombreux bâtiments sont visibles des caissons de climatisation. Devant nous, un chantier soulève tant de poussière que nous avons du mal à trouver notre chemin. Dans les jardins, la couleur dominante est passée du vert vif au jaune, car la végétation souffre de la sécheresse.

Nous descendons vers la rivière, la traversons et suivons ses rives. Il n'y a plus de traces du camping qui se trouvait ici autrefois.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Les bâtiments n'ont pas une apparence uniforme. Nous passons devant des chalets historiques en bois ainsi que des bâtiments anciens en pierre avec des toits recouverts de dalles de pierre et des avant-toits pour se protéger de la neige. Entre eux ont été construits des bâtiments plus récents. Ils sont de couleur plus claire pour conserver la fraîcheur en été. Beaucoup ont des murs épais, comme c'était le cas autrefois pour les maisons traditionnelles en pierre, afin de rester frais à l'intérieur en été. Ils sont souvent dotés de toits plats et de balcons végétalisés, car il ne faut plus guère s'attendre à des charges de neige importantes et la végétation a un effet rafraîchissant en cas de fortes chaleurs. De nombreux bâtiments ont des panneaux solaires sur le toit. Dans les jardins, on remarque les nombreux arbres qui font de l'ombre, beaucoup plus nombreux que dans les années 2020. Les propriétaires essaient autant que possible de faire de leurs jardins des oasis de fraîcheur. De temps en temps, nous passons devant de grandes prairies avec des arbres fruitiers au sein même du village. Cette structure villageoise clairsemée avec de nombreux espaces verts rend la chaleur supportable et offre à la population un climat agréable pour vivre et travailler. Le village tire une partie de ses revenus du tourisme et de l'hôtellerie. Bien que le village ait été autrefois avant

tout une destination hivernale, on mise aujourd'hui sur une offre touristique diversifiée qui propose des attractions variées pour chaque saison, même s'il n'y a généralement plus de neige en hiver. Pendant les périodes de canicule, les offres estivales attirent de nombreuses personnes dans les régions de montagne relativement fraîches, où elles peuvent se rafraîchir et se divertir. Nous passons à la périphérie du village devant un chalet traditionnel utilisé à des fins touristiques. Au-dessus du chalet, un jardin coloré d'herbes et de fleurs a été aménagé, dans lequel une famille de visiteurs apprend à utiliser des herbes pour préparer son propre mélange de thé. Une scène typique, car le village mise en premier lieu sur des offres saisonnières, locales et familiales. Aucune grande installation touristique n'est donc visible dans le paysage et les offres existantes s'intègrent discrètement dans la structure villageoise. Le petit domaine skiable du village a été fermé dans les années 2030 en raison du manque de neige. Une partie des remontées mécaniques a été démantelée et il ne reste aujourd'hui qu'un télésiège permettant d'accéder facilement aux zones de randonnée, d'escalade et de VTT. La fermeture du domaine skiable a été une déception pour les habitants du village, car les sports d'hiver étaient un élément important de la vie locale.

Nous sortons du village et descendons vers la rivière. Nous la traversons et atteignons un camping sur l'autre rive. Il s'est développé au fil des ans, car il complète bien les autres offres touristiques de la région. Lors de son agrandissement, de nombreux nouveaux arbres ont été plantés pour assurer l'ombrage des parcelles. C'est pourquoi nous n'avons pas pu distinguer véritablement le camping depuis le village.

5.2.2 Une rivière

La rivière est alimentée par de nombreux torrents qui prennent leur source sur les versants bien en amont de la vallée. Actuellement, son débit est faible en raison de la sécheresse. En raison de la diminution des chutes de neige, de la disparition des glaciers et de la fréquence des longues périodes de sécheresse en été, les niveaux d'eau sont souvent bas en été, ce qui a un effet négatif sur l'écosystème aquatique. La rivière ressemble actuellement plus à un ruisseau qu'à une rivière. Les traces de la sécheresse ne sont pas les seules visibles: celles des crues le sont aussi. L'intensité et la fréquence des fortes précipitations ont augmenté. De plus, de nos jours, les précipitations tombent davantage sous forme de pluie que de neige et s'écoulent donc directement. Cela a prolongé la saison des crues dans les bassins versants alpins et, au début de l'été, le risque de superposition de la fonte des neiges et des précipitations intenses est plus élevé. Dans l'ensemble, cela entraîne des crues plus fréquentes et l'érosion et les transferts de matériaux s'intensifient dans les rivières de montagne. Par ailleurs, la diminution du volume des glaciers et le retrait du permafrost en haute montagne ont rendu les pentes plus instables. L'apport accru de sédiments provenant des torrents environnants a entraîné des dépôts visibles dans le chenal de la rivière et, en amont du pont, le cours de la rivière a été déplacé de plusieurs mètres par des dépôts d'alluvions. Quelques mètres plus loin, nous voyons les traces d'une coulée de boue. Les crues plus fréquentes et la disponibilité de roches meubles ont contribué à l'augmentation de ce type d'événements. Nous nous promenons le long de la rive en aval. Nous rencontrons régulièrement des endroits recouverts d'une plante à fleurs roses. Cette touche de couleur est certes belle, mais elle pose problème, car cette plante est fortement invasive et, en raison des changements climatiques, elle est mieux adaptée aux conditions actuelles que d'autres espèces indigènes. Les autorités ont donc pris des mesures pour endiguer la propagation de la plante. Nous arrivons au prochain village.

5.2.3 Un torrent

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Le village est traversé par un torrent qui vient de la haute montagne et qui est canalisé dans son cours inférieur. Des travaux de déblaiement et de petites réparations de bâ-

timents ont actuellement lieu dans les environs du torrent, car des pluies de plusieurs jours suivies d'un violent orage il y a quelques semaines ont déclenché une lave torrentielle qui a dépassé la capacité d'écoulement du chenal. La lave torrentielle est sortie du chenal et a d'abord traversé un pâturage avant de se frayer un chemin à travers le village. Ses traces sont clairement visibles, des débris rocheux et de la boue jonchent les rues. Heureusement, grâce à une évacuation précoce, personne n'a été blessé, mais des dégâts ont été causés aux bâtiments et aux infrastructures, ce qui a entraîné des coûts élevés. Les traces de la lave torrentielle sont clairement visibles lors de notre promenade à travers les prairies jusqu'à la lisière de la forêt, sous la forme d'une bande brune de boue et de blocs de pierre de différentes tailles. Nous regardons vers l'aval de la vallée et distinguons l'emplacement de l'ancien camping près de l'embouchure du torrent dans la rivière. Le camping a dû être fermé en raison du risque élevé d'inondations et de laves torrentielles.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Jusque dans les années 2030, le village était traversé par un torrent qui venait de la haute montagne et qui était canalisé dans son cours inférieur. Nous remontons à travers le village jusqu'à la forêt et suivons un chemin sur environ 200 m dans la forêt. On y voit un collecteur destiné à retenir les matériaux solides comme les roches et le bois lors d'épisodes de crues. A l'aval de ce collecteur, le torrent suit aujourd'hui un nouveau cours et s'écoule dans un chenal artificiel, mais non canalisé, à travers une grande prairie à l'extérieur du village et se jette dans la rivière à environ 300 m du village. Ces mesures ont permis de réduire considérablement le risque de laves torrentielles dans le village et les matériaux dépassant la capacité du collecteur peuvent se déposer dans la prairie avec un risque comparativement faible. Les cartes des dangers ont été adaptées en conséquence et l'école avec salle polyvalente qui avait besoin d'être rénovée et qui se trouvait auparavant sur la grande prairie a été reconstruite à l'autre bout du village dans un nouveau bâtiment de remplacement. Grâce à ces mesures d'adaptation à l'évolution des conditions, les habitants et les touristes se sentent en sécurité. Nous regardons en direction du camping. Grâce à des systèmes de surveillance et d'alerte précoce performants ainsi qu'à des concepts d'urgence, le camping situé près de l'ancienne embouchure du torrent peut continuer à être exploité et les rives de la rivière peuvent continuer à être utilisées par les hôtes et par la population du village comme espace de détente avec des possibilités de rafraîchissement bienvenues.

5.2.4 La forêt

Nous continuons à suivre le chemin de randonnée vers l'amont, dans la forêt. C'est une forêt de protection des zones d'habitation et des infrastructures contre différents dangers naturels, tels que les avalanches, les chutes de pierres ou les glissements de terrain. Alors qu'au début du XXI^e siècle, la fonction de protection contre les avalanches était encore centrale, elle a perdu de son importance car il y a moins de neige et, par conséquent, le nombre de jours critiques pour les avalanches qui se déclenchent en forêt a diminué. En revanche, le retrait du permafrost provoqué par le changement climatique a augmenté le risque de glissements de terrain, de chutes de pierres et de laves torrentielles. De plus, les températures plus élevées et la hausse de la limite d'enneigement font que davantage de précipitations tombent sous forme de pluie plutôt que de neige, ce qui entraîne un risque accru de glissements de terrain superficiels, de coulées de boue et d'érosion des sols. C'est pourquoi les fonctions de protection de la forêt contre les chutes de pierres, les coulées de boue, les glissements de terrain et l'érosion des sols doivent être renforcées. Par ailleurs, les forêts de montagne sont aujourd'hui plus menacées qu'auparavant par les parasites. Ceux-ci peuvent se propager plus rapidement et plus fortement, même en altitude, en raison de l'augmentation des températures et de la sécheresse croissante.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

De loin, on remarque déjà de grandes surfaces sans arbres. Les épicéas ont longtemps fait partie des principales essences de cette forêt, mais ils ne peuvent plus prospérer sur ce site trop sec. De plus, de nombreux parasites profitent de la hausse des températures et de la sécheresse. Ainsi, la forêt n'a pas l'air saine dans son ensemble et souffre du dépérissement des essences principales. Néanmoins, nous trouvons aussi des arbres sains dans la forêt. Il s'agit surtout de feuillus, de mélèzes et de sapins. Nous continuons à nous enfoncer dans la forêt et atteignons, sur un versant exposé, une portion de forêt qui a dû être récemment défrichée en raison d'une attaque de parasites. Il fait chaud ici. Les travaux de nettoyage ne sont pas encore terminés et nous ne pouvons donc pas emprunter le chemin initialement prévu, mais devons faire un détour. Même l'itinéraire alternatif est impraticable car il traverse une zone de glissement de terrain. Ici, les arbres sont penchés et le sol est parsemé de grandes aspérités et de fissures. Le sentier a été partiellement déplacé d'environ deux mètres par le glissement de terrain, ce qui a entraîné la formation de hautes marches. Comme la forêt est plus dénudée et massivement endommagée par endroits, son effet protecteur est fortement altéré. Nous passons à côté d'un mur de soutènement en béton qui protège le versant contre les glissements.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

La forêt dans laquelle nous nous promenons en haut de la pente semble, à première vue, ne pas avoir beaucoup changé à cause du changement climatique. Nous voyons quelques arbres isolés qui ne semblent pas en bonne santé ou qui sont morts, mais dans l'ensemble, la forêt paraît dense et saine. Ce n'est qu'en y regardant de plus près que l'on s'aperçoit que la composition des espèces d'arbres a changé. On trouve ainsi moins d'épicéas et plus de sapins, de mélèzes et de feuillus. Ces arbres sont plus résilients face aux périodes de sécheresse prolongées. L'augmentation de la proportion de feuillus est clairement visible en termes de couleur, car la forêt apparaît dans des tons verts plus clairs au printemps et en été et partiellement bruns en hiver. Bien que la proportion de feuillus ait nettement augmenté, les conifères présents conservent une valeur économique. Il y a quelques décennies déjà, des mesures d'entretien appropriées ont permis de promouvoir des essences bien adaptées au climat actuel et notamment aux périodes de sécheresse plus fréquentes. Ainsi, la forêt peut toujours remplir les fonctions de protection. L'entretien des forêts de protection alpines est très précisément adapté aux conditions pédologiques et climatiques de chaque site, afin de pouvoir répondre aux exigences de protection spécifiques. Nous arrivons à une parcelle de forêt récemment reboisée et clôturée. Elle a été défrichée parce qu'elle était infestée de scolytes. Grâce à un système d'alerte précoce, l'attaque des parasites a été détectée à temps et seule une petite surface de la forêt a dû être défrichée. La clôture sert à repousser le gibier, qui peut causer de graves dégâts liés à l'abroustissement aux jeunes arbres.

Après une longue montée, nous atteignons la limite supérieure de la forêt. Elle s'est nettement déplacée vers le haut au cours des cent dernières années, car la limitation de la croissance par le froid a diminué. Par conséquent, la forêt a gagné en surface à de nombreux endroits de la vallée et la surface d'exploitation des alpages a diminué. Au-dessus de la forêt, nous jouissons d'une belle vue sur la vallée et sur le versant opposé. Nous y voyons une forêt dont la moitié de la surface a été brûlée. Quelques troncs d'arbres carbonisés dépassent de la surface noire. En raison de l'absence de forêt, le terrain est particulièrement sensible à l'érosion, ce qui peut entraîner des glissements de terrain superficiels et des coulées de boue. Le risque d'incendie de forêt est très élevé cet été en raison de la sécheresse persistante, même dans les régions de montagne, et les feux sont interdits presque partout. Des erreurs humaines et des conditions de vent défavorables provoquent régulièrement des incendies de forêt dont les traces sont visibles dans le paysage pendant des années et entraînent des pertes de la fonction protectrice de la forêt. Sur le versant opposé, nous voyons une portion de forêt qui a récemment pris feu.

Le paysage actuel**Le paysage futur en cas d'adaptation lente et réactive au changement climatique****Le paysage futur dans le cadre d'une adaptation proactive au changement climatique**

Fig. 5.4: Extraits des photos panoramiques à 360° montrant trois états possibles d'un paysage dans une région de montagne. Elles se réfèrent aux descriptions concernant le torrent, la forêt et la zone glaciaire. Les images sont une combinaison de deux photographies de la région de l'Entremont. © Ikonaut GmbH

Adaptation lente et réactive au changement climatique

En raison du manque de possibilités de prélèvement d'eau par les hélicoptères, l'incendie de forêt a été difficile à éteindre: c'est pourquoi la moitié de la forêt a brûlé.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Grâce à de nombreux points d'eau pour les hélicoptères, l'incendie a pu rapidement être maîtrisé. La surface brûlée est minimale.

5.2.5 En téléphérique jusqu'à un point de vue

Nous arrivons à la station intermédiaire d'un téléphérique qui mène à un sommet de plus de 2 500 mètres. Nous montons à bord et, après quelques minutes de trajet, nous voyons sur notre gauche une grande installation solaire avec des panneaux photovoltaïques particulièrement adaptés aux régions alpines. L'installation se trouve sur un pâturage et des chèvres paissent sous les panneaux, profitant de l'ombre supplémentaire par ce temps chaud. Arrivés en haut, nous parcourons les 500 mètres restants jusqu'au point de vue. De là, nous avons une bonne vue panoramique sur les sommets, sur les zones de haute montagne, sur la vallée d'où nous sommes partis et sur ce qui était autrefois le plus grand glacier de la région. Il n'en reste qu'une toute petite portion, le reste ayant totalement fondu. La fonte du glacier a changé l'ambiance et l'attrait touristique de la région. Le paysage a subi de gros changements de couleur depuis les années 2020, passant du blanc au gris, car en été il n'y a presque pas de neige, même sur les hauts sommets, et la plupart des névés et des glaciers ont disparu. Nous voyons maintenant des rochers et des éboulis gris. Ailleurs, les couleurs sont passées du vert au jaune: les prairies non irriguées apparaissent jaunes et sont moins productives en raison de la sécheresse estivale.

5.2.6 Un lac dans une ancienne région glaciaire

Nous regardons l'ancienne zone glaciaire sur le versant opposé. Le retrait du glacier a mis à jour une nette dépression dans laquelle un lac de plus en plus grand s'est formé au fil du temps. Il assume une partie de la fonction de stockage de l'eau du glacier, ce qui est également important pour les régions situées plus bas. Il compense en partie les modifications des débits saisonniers et les étiages plus prononcés en été en raison du changement climatique. Sur le lac se trouve une installation solaire flottante qui ressemble à un grand radeau recouvert de panneaux bleu foncé inclinés. De telles installations solaires existaient déjà sporadiquement dans cette région dans les années 2020, mais on les trouve aujourd'hui sur presque tous les grands lacs de la région. Au cours du retrait du glacier, des éboulements importants se sont produits à plusieurs reprises car les flancs de la vallée se sont trouvés en déséquilibre en raison du retrait du glacier. Les traces de ces éboulements sont visibles à certains endroits sous forme de cônes rocheux. Si un tel événement se produisait sur la rive du lac, la chute de la masse rocheuse pourrait provoquer un raz-de-marée qui provoquerait des dégâts considérables loin en aval.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Grâce à la construction d'un barrage, l'eau a pu être retenue pour former un important lac d'accumulation et contribuer de manière significative à l'approvisionnement en énergie. Le barrage, exposé au sud, est recouvert de panneaux solaires. La production d'énergie revêt une grande importance dans la région et marque le paysage. Le barrage se distingue dans le paysage et l'écosystème fluvial en aval a été fortement modifié. Le niveau du lac peut être réglé grâce au barrage, ce qui contribue à réguler les débits dans le bassin versant autant en situation de crue que d'étiage. Le risque d'éboulements et de raz-de-marée a été pris en compte lors de la construction du barrage: des déversoirs et un franc-bord suffisant contre les ondes ont été aménagés. L'apport supplémentaire

de sédiments dû au dégel du permafrost peut entraîner l'ensablement du lac et endommager les infrastructures autour du barrage. Les infrastructures doivent donc être bien entretenues, ce qui entraîne des coûts d'entretien élevés.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

La taille du lac est déterminée par les conditions géomorphologiques naturelles. Après le retrait rapide du glacier, de nombreux nouveaux habitats se sont formés dans et autour du lac sur le terrain ainsi mis à nu. Plusieurs sentiers de randonnée et de VTT longent les versants autour du lac et mènent parfois directement à la rive, qui peut être utilisée comme espace de détente. Sur le lac, nous voyons une poignée de paddles et de bateaux pneumatiques et les plus courageux nagent ou barbotent même dans les eaux froides du lac de montagne. Un remblai a été aménagé pour maintenir le lac en permanence et pouvoir réguler le niveau de l'eau. Plus loin en aval, nous voyons d'autres lacs de ce type, qui servent également de bassins de compensation en cas de raz-de-marée, afin de réduire les éventuels dommages aux habitations et aux infrastructures dans la vallée.

5.2.7 L'agriculture de montagne

Nous poursuivons notre chemin en direction de la vallée. Après environ une heure de marche, nous avons laissé derrière nous l'environnement de haute montagne et marchons de plus en plus à travers des prairies. Nous nous arrêtons dans une prairie qui n'est plus utilisée pour l'agriculture car aucune conduite d'eau n'y a été posée et les sources sont tarées. De nombreuses fleurs s'épanouissent dans la prairie, autour desquelles dansent papillons et autres insectes. Outre quelques buissons isolés, nous trouvons de nombreuses espèces rares qui n'auraient aucune chance dans les prairies et les pâturages irrigués.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Nous arrivons à un alpage où les vaches sont estivées, un spectacle rare de nos jours. Le réchauffement, l'enneigement plus court ou parfois inexistant, ainsi qu'une période de végétation plus longue permettent certes une montée à l'alpage plus tôt et une durée d'alpage plus longue qu'au début du siècle. Mais de nombreux alpages ont dû être abandonnés parce qu'il n'y a plus suffisamment d'eau pour les animaux. En raison de la sécheresse estivale croissante, dans les régions alpines de nombreuses sources n'apportent presque plus d'eau. De plus, il n'existe guère de procédures efficaces coordonnées au niveau régional pour la distribution de l'eau et l'infrastructure d'irrigation traditionnelle n'a pas été suffisamment entretenue ou adaptée à l'évolution des disponibilités en eau. Comme il y a aujourd'hui moins d'alpages disponibles pour l'estivage, la région peut globalement élever moins de bêtes.

Après une descente abrupte, nous atteignons le fond de la vallée. Nous y voyons de nombreuses prairies sèches et jaunes qui présentent des signes évidents de désertification, c'est-à-dire des zones sèches sans végétation avec formation de poussière. À ces endroits, le vent et l'eau ont fortement érodé la couche supérieure du sol et les substances nutritives ont été en grande partie lessivées. Les rares prairies qui peuvent encore être irriguées se distinguent clairement par leur couleur verte. Sans irrigation, les prairies se dessèchent et la récolte de foin devient si faible qu'elle n'est plus rentable. Beaucoup plus de prairies et de pâturages doivent aujourd'hui être irrigués et l'irrigation doit être plus régulière et plus intensive. Au fond de la vallée également, il manque des stratégies efficaces de répartition de l'eau coordonnées au niveau régional. C'est pourquoi il est loin d'être possible d'irriguer tous les pâturages, prairies et cultures nécessitant une irrigation. En raison des problèmes liés à la sécheresse et des pertes de rendement qui en découlent, de nombreuses exploitations ont été abandonnées et l'importance de l'agriculture a globalement diminué dans la région.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Notre chemin suit un canal d'irrigation, appelé bisse. En raison de la sécheresse estivale croissante, de nombreuses sources des régions alpines produisent moins d'eau qu'au début du siècle. Pour compenser la diminution du débit des sources, l'eau du lac situé dans l'ancienne région glaciaire est acheminée par des bisses vers les prairies alpines. Nous arrivons à un pâturage alpin où des vaches sont estivées. L'économie laitière et la production de fromage profitent de la montée à l'alpage plus précoce et de la durée d'alpage plus longue qu'au début du siècle. L'importance des alpages comme source de fourrage pour le bétail a augmenté, car même si la sécheresse et le manque d'eau peuvent aussi être problématiques à ces altitudes plus élevées, la sécheresse est moins aiguë qu'en plaine. De plus, les animaux souffrent moins du stress dû à la chaleur en altitude que dans le Moyen Pays, raison pour laquelle l'estivage à l'alpage est encouragé financièrement en tant que mode d'élevage adapté au site. Mais cette année, la longue période de sécheresse a également entraîné une pénurie d'eau dans la région. Grâce à des systèmes d'irrigation coordonnés au niveau régional, il est possible de s'assurer qu'il y ait encore suffisamment d'eau pour abreuver les animaux. En raison de la montée de la limite de la forêt, il faut veiller année après année à ce que les pâturages alpins ne s'embroussaillent pas. Sur l'alpage où nous nous trouvons, ces travaux sont effectués en commun par tous les membres de la coopérative d'alpage. Sur certaines surfaces, des systèmes sylvo-pastoraux ont été introduits, comme il en existait au début du siècle, surtout dans le Jura. Dans ces pâturages boisés, on favorise de manière ciblée les arbres isolés, qui fournissent de l'ombre aux animaux et favorisent l'attractivité du paysage.

Après une descente abrupte, nous atteignons le fond de la vallée et voyons différents champs. Depuis le milieu du XXI^e siècle, les cultures connaissent un nouvel essor dans la région. Cet essor s'explique d'une part par l'amélioration des conditions de culture, une diminution de la durée d'enneigement et des dégâts dus au gel, ainsi que par des températures moyennes plus élevées et une période de végétation plus longue. D'autre part, les pertes de récolte dues à l'intensification du stress hydrique et thermique, qui touche toute la Suisse mais tout particulièrement le Moyen Pays, jouent un rôle. Les conditions d'implantation de certaines cultures ont changé et leur culture est devenue plus difficile dans le Moyen Pays. Ici, dans l'espace alpin, les conditions sont comparativement bonnes. Nous passons devant un champ de seigle, un champ de pommes de terre et une prairie irriguée. Aujourd'hui, beaucoup plus de cultures doivent être irriguées que par le passé, et ce de manière plus régulière et intensive. L'infrastructure d'irrigation a dû être adaptée en conséquence et la distribution d'eau est coordonnée au niveau régional afin de permettre une répartition équitable de l'eau disponible. Un grand nombre d'acteurs de la région ainsi que des conseillers scientifiques ont été impliqués dans la négociation de ces systèmes, ce qui a contribué à l'acceptation des stratégies de gestion de l'eau. Malgré cela, les années de sécheresse extrême donnent régulièrement lieu à des conflits car il n'y a pas assez d'eau pour couvrir tous les besoins, tels que l'eau potable, la production d'énergie et l'irrigation. L'année dernière, par exemple, cela a entraîné d'importantes pertes de récoltes et des goulets d'étranglement dans la production de fourrage. Bien que cette année soit également sèche, l'eau est pour l'instant encore suffisante pour l'irrigation.

En nous promenant, nous voyons, comme dans le Moyen Pays, des haies, des arbres et des bandes fleuries entre les cultures agricoles, qui ont été érigés pour protéger du vent, donner de l'ombre ou favoriser la biodiversité. En raison des conditions plus chaudes, les parasites sont de plus en plus nombreux dans les régions de montagne et la protection des plantes a également gagné en importance dans l'agriculture de montagne. Les haies et les bandes fleuries visent notamment à favoriser les insectes utiles. Nous voyons également de nombreux ruchers à proximité de ces derniers.

Nous atteignons un champ où des baies ont été récoltées au début de l'été et regardons vers le haut de la pente où nous voyons des vignes. Dans la région, la vigne et les baies étaient déjà cultivées autrefois. Grâce à l'évolution des conditions climatiques, ces cultures ont pu être étendues à des altitudes plus élevées. Certes, la production agricole de la région se concentre toujours sur l'élevage laitier, mais des produits

de niche comme le miel, les céréales, le raisin, les herbes aromatiques et médicinales et les petits fruits ont été encouragés de manière ciblée ces dernières années et produits par différentes exploitations. Cette diversité de la production a renforcé l'agriculture de la région et l'a rendue moins vulnérable aux perturbations.

5.2.8 Une vue sur une grande station touristique

Nous atteignons un point de vue d'où nous pouvons observer, sur le versant opposé de la montagne, la plus grande station touristique de la région. Le village s'étend sur une vaste surface et se compose de nombreux chalets. Autour du village, nous voyons de nombreuses remontées mécaniques ainsi que des surfaces utilisées comme pistes de ski en hiver. La station est considérée comme l'une des dernières grandes destinations de sports d'hiver des Alpes. Elle s'y prête parce qu'au début du siècle déjà, des remontées mécaniques existaient jusqu'à plus de 3 000 mètres d'altitude: la région est donc considérée comme relativement sûre en termes d'enneigement. La destination est soutenue par l'État et constitue une source de revenus centrale pour la région.

Adaptation lente et réactive au changement climatique

Afin de maintenir la rentabilité du domaine skiable, celui-ci a été étendu à des altitudes plus élevées et les installations d'enneigement ont été installées à grands frais. Cela s'accompagne d'une consommation d'eau nettement plus élevée que par le passé, ce qui entraîne parfois une pénurie d'eau pour l'agriculture et la végétation naturelle. L'extension du domaine skiable a nécessité la construction de divers ouvrages de protection et un modelage complexe du terrain afin de minimiser le risque accru de glissements de terrain et d'éboulements dû à la disparition du permafrost. En outre, les nouvelles infrastructures ont un impact considérable sur le paysage et la biodiversité. En été, les infrastructures nouvellement construites ne sont guère utilisées.

Adaptation anticipée et proactive au changement climatique

Certaines pistes et remontées mécaniques ont été démantelées, notamment sur d'anciens glaciers et sur des pentes présentant un risque de glissement en raison du dégel du permafrost. En revanche, la région touristique a été stratégiquement orientée vers le tourisme à l'année. Par exemple, un lac de stockage d'eau, qui sert à l'enneigement en hiver, peut être utilisé comme lac de baignade en été.

Nous descendons la rue jusqu'au village, où nous prenons le bus pour retourner en 2023.

6 Discussion et conclusion

Ce projet a montré qu'un climat plus chaud d'environ 4°C en moyenne modifiera fondamentalement les qualités et les prestations des paysages en Suisse. De nombreuses modifications des écosystèmes et des habitats naturels seront visibles dans le paysage, par exemple la limite des forêts nettement plus élevée ou la disparition des glaciers. L'augmentation attendue des dangers naturels modifiera également fortement le paysage. Dans les régions de montagne, les laves torrentielles, les glissements de terrain, les éboulements et les ouvrages de protection pour y faire face laisseront leurs traces dans le paysage. Dans le Moyen Pays, il faut s'attendre à des crues plus fréquentes et les mesures de protection contre les inondations, des hautes digues aux élargissements naturels des rivières, seront visibles dans le paysage. Le feu menace les forêts dans toutes les régions. Les forêts pourront être maintenues en grande partie en bonne santé si elles sont gérées à temps de manière à être adaptées à l'évolution des conditions environnementales et aux phénomènes météorologiques extrêmes. Les conifères et les hêtres auront la vie dure et devraient être remplacés par des essences de feuillus résistantes à la sécheresse. Les forêts typiques du Jura et du Tessin vont subir de profondes transformations. Les forêts de châtaigniers reculeront dans la plaine tessinoise et pourront être remplacées par des forêts de chênes, tandis que les conditions de vie des châtaigniers pourront s'améliorer dans le Jura. Des périodes de sécheresse répétées et prolongées peuvent parfois faire apparaître les surfaces agricoles du Moyen Pays comme des étendues brunes et poussiéreuses. Le passage à des cultures résistant à la sécheresse peut modifier la palette de couleurs des champs. Le développement des serres pour une utilisation plus efficace de l'eau, des engrais et des produits phytosanitaires aura également une forte influence sur le paysage. Ainsi, l'adaptation de l'agriculture au changement climatique aura aussi un impact sur le paysage. La chaleur peut devenir un problème dans les zones urbaines et les mesures prises pour l'atténuer peuvent modifier l'aspect des agglomérations. Enfin, l'infrastructure de production d'énergie, qui n'a été abordée que de manière réduite dans ce projet, aura également une influence sur le paysage. Si l'utilisation de l'énergie éolienne et solaire doit être développée, les infrastructures correspondantes seront visibles dans le paysage et nécessiteront une évaluation minutieuse de leur emplacement.

Les chapitres 4 et 5 ont présenté différentes variantes de développements possibles, car l'aspect réel du paysage dans un climat beaucoup plus chaud dépend fortement des décisions de la société et de la politique. L'humain dispose d'une marge de manœuvre considérable pour l'aménager. Deux voies de développement opposées ont été choisies dans ce projet – une stratégie réactive et proactive d'adaptation au changement climatique – conduisant à des qualités nettement différentes du paysage. Il s'agit non seulement de montrer l'étendue des possibilités, mais aussi d'inciter à réfléchir aux conséquences que l'action ou l'inaction humaine peuvent avoir sur le paysage dans un climat en mutation. La société doit se préoccuper davantage de cette question car le changement climatique concerne tout le monde et chacun profite des prestations du paysage. En outre, de nombreuses mesures d'adaptation au changement climatique doivent être planifiées et mises en œuvre suffisamment tôt. Cela vaut en particulier pour les mesures à long terme dans les forêts ou pour l'aménagement naturel des cours d'eau en vue de la protection contre les crues.

Ce projet présente toutefois plusieurs limites. Ainsi, les états du paysage représentés sont ceux qui peuvent se produire dans l'hypothèse d'un réchauffement moyen d'environ 4°C. Comme mentionné au chapitre 2.4, un réchauffement de 4°C en moyenne par rapport à la période 1981–2010 n'est prédit pour la Suisse que dans le scénario RCP 8.5 des scénarios climatiques CH2018 pour la fin du XXI^e siècle. Ainsi, les conclusions issues de ce projet se réfèrent à un horizon temporel long et présentent une grande incertitude. De plus, les modélisations n'ont pris en compte que le changement climatique comme moteur des modifications du paysage. Certaines modifications du paysage ont certes été déduites en tant que conséquences de stratégies d'adaptation au changement climatique, mais aucun scénario relatif aux moteurs techniques, économiques, sociaux ou politiques de la modification du paysage n'a été pris en compte. Par exemple, on a supposé que les bases juridiques actuelles des politiques sectorielles (notamment la

loi sur la protection de l'environnement, la loi sur la protection de la nature, la loi sur l'aménagement du territoire, la loi sur les forêts, la loi sur l'agriculture) conservassent leur validité à la fin du siècle.

Enfin, il convient de noter que dans un climat 4°C plus chaud même si l'on s'adapte au changement climatique de manière prévoyante et proactive, les paysages seront dans le futur moins attrayants et les conditions de vie moins agréables pour l'humain qu'aujourd'hui. Dans l'ensemble, le changement climatique comporte également plus de risques que d'opportunités pour les paysages. Les mesures visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à atténuer le réchauffement des températures induit par l'humain sont donc au moins aussi importantes que l'adaptation au changement climatique.

7 Références

- Adde A., Rey P.-L., Brun P., Külling N., Fopp F., Altermatt F., ... (2023) N-SDM: a high-performance computing pipeline for Nested Species Distribution Modelling. *Ecography*, 2023 (6) pp. e06540
- Bebi P., Bugmann H., Lüscher P., Lange B., Brang P. (2016) Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. Hrsg.: Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. S. 269–285.
- Brang P., Küchli C., Schwitter R., Bugmann H., Ammann P. (2016) Waldbauliche Strategien im Klimawandel. In: Pluess A.R., Augustin S., Brang P. Hrsg.: Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien. S. 341–364.
- Bürgi M., Hersperger A.M., Schneeberger N. (2004) Driving forces of landscape change – current and new directions. *Landsc. Ecol.* 19: 857–868.
- Buttler A., Spiegelberger T., Chételat J., Kalbermatten M., Lannas K., Peringer A., ... (2012) Evolution récente et future des paysages sylvo-pastoraux du Jura vaudois. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen* 1163, 12: 469–480. doi.org/10.3188/szf.2012.0469
- Conseil fédéral (2012) Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Objectifs, défis et champs d'action. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. 66 p. Téléchargement: www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/adaptation-changements-climatiques-suisse-2012.html
- Conseil fédéral (2020) Adaptation aux changements climatiques en Suisse. Plan d'action 2020–2025. Berne, 164 p. Téléchargement: www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/info-specialistes/adaptation-changement-climatique/strategie.html
- Council of Europe (2000) Council of Europe Landscape Convention as amended by the 2016 Protocol. *European Treaty Series*, 176
- Davies, B. (2022) Glaciers as a water resource. www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/glacier-recession/glaciers-as-a-water-resource/ (Accès 28.6.2023)
- Felber F., Di Maio E., Schaefer K., Chervet N., Gesset L., Randin C. (2017) Graines pour le futur: Conservation et recherche à l'Institut Vavilov et en Suisse. Avec les photographies de Mario Del Curto. Edité par les Musées et Jardins botaniques cantonaux, Lausanne. 76 p.
- Gehrig-Fasel J., Guisan A., Zimmermann N.E. (2007) Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *J. Veg. Sci.* 18: 571–582. doi.org/10.1111/j.1654-1103.2007.tb02571.x
- Graf U., Boch S., Bergamini A. (2021) Abklärungen zu Auswirkungen des Klimawandels auf Moore im Kanton Zürich. S. 30.
- Harris D.M. (2020) Telling Stories about Climate Change. *he Prof. Geogr.* 72, 3: 309–316. doi.org/10.1080/00330124.2019.1686996
- Haerberli W., Bütler M., Huggel C., Müller H., Schleiss A. (Hrsg.) (2013) Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Forschungsbericht des Nationalen Forschungsprogramms NFP 61. vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, Zürich. 300 S.
- Jouvet G., Huss M. (2019) Future retreat of Great Aletsch Glacier. *J. Glaciol.* 1–4. doi.org/10.1017/jog.2019.52
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/
- Keller R., Clivaz M., Reynard E., Backhaus N. (2019) Increasing Landscape Appreciation through the Landscape Services Approach. A Case Study from Switzerland. *Sustainability* 11: 5826. doi.org/10.3390/su11205826
- Keller R., Backhaus N. (2020) Integrating landscape services into policy and practice – a case study from Switzerland. *Landsc. Res.* 45, 1: 111–122. doi.org/10.1080/01426397.2019.1569218
- Köllner P., Gross C., Schächli B., Füssler J., Lerch J., Nauser M. (2017) Klimabedingte Risiken und Chancen. Eine schweizweite Synthese. Bundesamt für Umwelt, Bern. *Umwelt-Wissen* 1706: 148 S. www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/publikationen-studien/publikationen/klimabedingte-risiken-und-chancen.html
- Lanz K., Reynard E., Calianno M., Milano M., Wechsler T. (2021) Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft der Schweiz. Bern, SCNAT, *Beitr. Hydrol. Schweiz* 43: 376 p. scnat.ch/de/uuid/i/7ba3924a-b845-56aa-b35a-48b60638fc1a-Auswirkungen_des_Klimawandels_auf_die_Wasserwirtschaft_der_Schweiz

- Moezzi M., Janda K.B., Rotmann S. (2017) Using stories, narratives, and storytelling in energy and climate change research. *Energy Research & Social Science* 31: 1–10. doi.org/10.1016/j.erss.2017.06.034
- Morris B.S., Chrysochou P., Christensen J.D., Orquin J.L., Barraza J., Zak P.J., Mitkidis P. (2019) Stories vs. facts: triggering emotion and action-taking on climate change. *Clim. Chang.* 154,1–2: 19–36. doi.org/10.1007/s10584-019-02425-6
- NCCS National Centre for Climate Services, 2018. CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien.html
- NCCS National Centre for Climate Services (2021a) Umgang mit Naturgefahren. Informationen zu Auswirkungen des Klimawandels und Massnahmen in verschiedenen Sektoren. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/sektoren/umgang-mit-naturgefahren.html (Accès 17.09.2022)
- NCCS National Centre for Climate Services (2021b) Tourismus. Informationen zu Auswirkungen des Klimawandels und Massnahmen in verschiedenen Sektoren. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/sektoren/tourismus.html (Accès 14.09.2022)
- NCCS National Centre for Climate Services (2022) Zahlen und Fakten. www.nccs.admin.ch/nccs/de/home/klimawandel-und-auswirkungen/schweizer-klimaszenarien/zahlen-und-fakten.html (Accès 20.02.2022)
- Nicholson-Cole S.A. (2005) Representing climate change futures: a critique on the use of images for visual communication. *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 3: 255–273. doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2004.05.002
- Niedermaier M., Plattner G., Egger G., Essl F., Zika F. (2011) Moore im Klimawandel. Studie des WWF Österreich, der Österreichischen Bundesforste und des Umweltbundesamtes. 24 S.
- OFEV/ARE (éd.) (2022) Eau de pluie dans l'espace urbain. Fortes précipitations et gestion des eaux pluviales dans le contexte d'un développement urbain adapté aux changements climatiques. Office fédéral de l'environnement (OFEV); Office fédéral du développement territorial (ARE). *Connaissance de l'environnement* n° 2201: 117 p. Téléchargement: www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/eau-de-pluie-dans-l-espace-urbain.html
- OFEV (éd.) (2021) Effets des changements climatiques sur les eaux suisses. Hydrologie, écologie et gestion des eaux. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement* 2101: 134 p. Téléchargement: www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/eaux/publications/publications-eaux/effets-des-changements-climatiques-sur-les-eaux-suisses.html
- OFEV (éd.) (2018) Quand la ville surchauffe. Bases pour un développement urbain adapté aux changements climatiques. Office fédéral de l'environnement, Berne. *Connaissance de l'environnement*, 1812: 109 p. Téléchargement: www.bafu.admin.ch/bafu/fr/home/themes/climat/publications-etudes/publications/quand-la-ville-surchauffe.html
- OFS, Office fédéral de la statistique. s.a. *Statistique suisse de la superficie*. https://www.bfs.admin.ch/bfs/fr/home/statistiques/espace-environnement/enquetes/area.html (Accès 20-02-2022)
- Pezzatti G.B., De Angelis A., Conedera M. (2016) Potenzielle Entwicklung der Waldbrandgefahr im Klimawandel. In: A.R. Pluess, S. Augustin, Brang, P. (Eds.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*: 223–244. Haupt. www.dora.lib4ri.ch/wsl/islandora/object/wsl:10619
- Pluess A.R., Augustin S., Brang P. (2016) *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern, Eidg. Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, Haupt, Bern, Stuttgart, Wien. 447 S.
- RAOnline (2023) Informationen über die Schweiz: Berichte über das Klima. RAOnline Schule & Bildung. www.raonline.ch/pages/edu/cli5/wearep06a.html#ch (Accès 14.07.2023)
- Rodewald R., Schwyzer Y., Liechti K. (2014) Katalog der charakteristischen Kulturlandschaften. Grundlage zur Ermittlung von Landschaftsentwicklungszielen. Stiftung Landschaftsschutz Schweiz (SL-FP), Bern. www.sl-fp.ch/de/stiftung-landschaftsschutz-schweiz/dokumentation/katalog-charakteristische-kulturlandschaften-53.html
- Rohde S. (2005) *Integrales Gewässermanagement – Erkenntnisse aus dem Rhône-Thur Projekt. Synthesebericht Gerinneaufweitungen*. Eidgenössische Forschungsanstalt WSL, Birmensdorf, 69 S. www.wsl.ch/land/products/rhone-thur/aufweitungen/docs/synthese.pdf
- Rumpf S., Gravey M., Brönnimann O., Luoto M., Cianfrani C., Mariethoz G., Guisan A. (2022) From white to green: Snow cover loss and increased vegetation productivity in the European Alps. *Science* 376/6597: 1119–1122. doi.org/10.1126/science.abn6697
- Schönfeld P. (2019) «Klimabäume» – welche Arten können in Zukunft gepflanzt werden? Bayerische Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau (Hrsg.), Veitshöchheim (De), 9 S. Téléchargement: www.lwg.bayern.de/mam/cms06/landespflge/dateien/zukunft_klimabaeume.pdf

- Siegrist E. (2022) Landschaften im Klimawandel – Evaluation und Darstellung der landschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz anhand der Falllandschaft Ramosch (GR). Masterarbeit Geographisches Institut Universität Bern. Téléchargement: Landschaften im Klimawandel – Evaluation und Darstellung der landschaftlichen Auswirkungen des Klimawandels in der Schweiz anhand der Falllandschaft Ramosch (GR) – Publikationen – WSL
- Steffen T., Huss M., Estermann R., Hodel E., Farinotti D. (2022) Volume, evolution, and sedimentation of future glacier lakes in Switzerland over the 21st century. *Earth Surf. Dyn.* 10: 723–741, doi:10.5194/esurf-10-723-2022. doi.org/10.5194/esurf-10-723-2022
- Van Vuuren D.P., Edmonds J., Kaimuna M., Riahi K., Thomson A., Hibbard K., ... (2011) The representative concentration pathways: an overview. *Clim. Chang.* 109: 5–31. doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z
- Verburg P.H., Soepboer W., Veldkamp A., Limpiada R., Espaldon V., Mastura S.S. (2002) Modeling the spatial dynamics of regional land use: the CLUE-S model. *Environ. Manage.* 30, 3: 391–405.
- Vervoort J.M., Kok K. (2010) Stepping into futures: Exploring the potential of interactive media for participatory scenarios on social-ecological systems. *Futures* 42: 604–616.
- Williams P.A., Allen C.D., Macalady A.K., Griffin D., Woodhouse C.A., Meko D.M., ... (2013) Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. *Nat. Clim. Chang.* 3: 292–297. doi.org/10.1038/nclimate1693

