



Interreg
ALCOTRA

Fonds européen de développement régional
Fondo europeo di sviluppo regionale



UNION EUROPÉENNE
UNIONE EUROPEA



ÉTAT DE L'ART DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA RÉGION ALPINE

GROUPE D'ACTIVITÉ :	3
ACTIVITÉ :	3.1
LIVRABLE :	3.1a
NOM DU DOCUMENT :	Etat de l'art des impacts du changement climatique dans la région alpine
VERSION DU DOCUMENT :	Finale
PARTENAIRE RESPONSABLE :	Polytechnique de Turin
DATE DE RÉDACTION :	30/06/2018
NATURE DU DOCUMENT :	Rapport technique
STATUT DU DOCUMENT :	Version finale
AUTEURS :	Marco Allocco (SEAcop), Simona Benetti (SEAcop), Luca Boccardo (SEAcop), Ilaria Bozzer (SEAcop), Nadia Caruso (POLITO), Aurélie Chamaret (UGA), Roberta Donato (SEAcop), Benjamin Einhorn (PARN), Stefania Frola (POLITO), Simon Gerard (PARN), Magali de Gouville (Envirhonalp), Céline Lutoff (UGA), Elena Pede (POLITO), Giorgio Quaglio (SEAcop), Cinzia Saponeri (SEAcop), Luca Staricco (POLITO), Ingrid Vigna (POLITO), Elisabetta Vitale Brovarone (POLITO)

SOMMAIRE DU DOCUMENT

Le rapport reconstruit l'état de l'art de la recherche sur les impacts du changement climatique liés aux secteurs d'activité humaine (risques naturels, agriculture, biodiversité, forêts, systèmes de peuplement et tourisme) et sur les contextes territoriaux (périurbains, zones agricoles, forêts, montagnes) pris en compte dans le projet ARTACLIM.

SOMMAIRE DU PROJET

ACRONYME :	ARTACLIM
TITRE DU PROJET :	Adaptation et Résilience des Territoires Alpains face au Changement Climatique
NUMÉRO DU PROJET :	1316
OBJECTIF SPÉCIFIQUE DU PROGRAMME :	2.1 CHANGEMENT CLIMATIQUE : améliorer la planification territoriale par les institutions publiques afin de s'adapter au changement climatique
COORDINATEUR :	AGATE : AGENCE ALPINE DES TERRITOIRES
PARTENAIRES :	<p>POLITO - DIST : Polytechnique de Turin – Pôle des Sciences, Projets et Politiques du Territoire</p> <p>UGA - Envirhonalp – PARN : Université de Grenoble Alpes - Pôle Rhône-Alpes recherche environnement pour le développement durable – Pôle alpin des risques naturels</p> <p>iiSBE Italia R&D : International Initiative for a Sustainable Built Environment, Italie Recherche et Développement</p> <p>SEAcop : Société Coopérative de Services et Activités Agro-Forestiers et Environnementaux</p> <p>VMT : Ville Métropolitaine de Turin</p> <p>PNRMB : Parc Naturel Régional du Massif des Bauges</p> <p>CCHC : Communauté de Communes du Haut-Chablais</p>
DÉBUT DU PROJET :	Mai 2017
DURÉE DU PROJET :	36 mois



Le projet ARTACLIM (n. 1316) a reçu un co-financement FEDER dans le cadre du Programme INTERREG ALCOTRA 2014-2020

SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
1. LES SCÉNARIOS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALPES.....	8
1.1 INTRODUCTION	8
1.1.1 <i>Quelques définitions</i>	8
1.1.2 <i>Les scénarios socio-économiques du GIEC</i>	9
1.1.3 <i>Du Global au Régional</i>	12
1.2 LES OBSERVATIONS : LA SIGNATURE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EST DÉJÀ PRÉSENTE.	13
1.2.1 <i>Evolution de la température</i>	14
1.2.2 <i>Evolution des précipitations liquides (pluie) et solides (neige)</i>	15
1.2.3 <i>Evolution des glaciers</i>	16
1.2.4 <i>Evolution de la biodiversité</i>	17
1.3 LES PROJECTIONS FUTURES : VERS DES INFORMATIONS AUX ÉCHELLES D'INTÉRÊT POUR LES QUESTIONS D'ADAPTATION.....	17
1.3.1 <i>Evolution de la température</i>	18
1.3.2 <i>Evolution des précipitations solides et liquides</i>	19
1.4 LES LIMITES ET QUESTIONS OUVERTES EN 2017	21
2 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RISQUES NATURELS DANS LES ALPES.....	23
2.1 INTRODUCTION	23
2.2 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUES SUR LES RISQUES NATURELS DANS LES ALPES.....	24
2.2.1 <i>Evolution des facteurs de contrôle des aléas</i>	24
2.2.2 <i>Impacts sur l'activité des aléas</i>	26
3 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE ALPINE.....	31
3.1 INTRODUCTION	31
3.2 FACTEURS D'IMPACT	31
3.2.1 <i>Hausse des températures</i>	31
3.2.2 <i>Des changements dans le régime des pluies</i>	32
3.2.3 <i>Événements extrêmes</i>	33
3.2.4 <i>Augmentation du CO₂ atmosphérique</i>	34
3.2.5 <i>L'augmentation des phytopathologies</i>	35
1.1.1. AUTRES IMPACTS.....	35
4 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ	37
4.1 INTRODUCTION	37
4.2 LES PRINCIPAUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ	37
4.3 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES	38
4.3.1 <i>Ecosystèmes aquatiques</i>	39
4.3.2 <i>Communauté et espèces animales</i>	40

4.3.3	<i>Végétation</i>	42
5	IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS	44
5.1	LES PRINCIPAUX MOTEURS DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS.....	44
5.1.1	<i>Hausse du CO₂ atmosphérique</i>	44
5.1.2	<i>Augmentation de la température</i>	47
5.1.3	<i>Variations des pluies</i>	47
5.1.4	<i>Problèmes de nature abiotique</i>	48
5.1.5	<i>Problèmes de nature biotique</i>	50
5.1.6	<i>D'autres impacts sur certains aspects de la physiologie des plantes</i>	51
5.1.7	<i>Sensibilité spécifique</i>	51
5.2	IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES.....	51
6	LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT BÂTI	53
6.1	INTRODUCTION	53
6.2	IMPACTS DIRECTS ET INDIRECTS SUR LE SYSTÈME DE PEUPLEMENT	53
7	LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE	57
7.1	INTRODUCTION	57
7.2	LE TOURISME DANS LES ALPES	57
7.3	LA RÉLATION ENTRE TOURISME ALPIN HIVERNAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE	58
7.4	LA RELATION ENTRE TOURISME ALPIN ESTIVAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	60
8	LES IMPACTS TRANSVERSAUX ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES.....	62
8.1	LA MATRICE INTERSECTORIELLES DES IMPACTS	62
8.2	SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES	63
8.2.1	<i>Méthodologie</i>	64
8.2.2	<i>Détermination de la base de référence pour l'évaluation des SE dans la zone de Pinerolo</i> 67	
8.2.3	<i>Analyse de la méthodologie appliquée pour l'évaluation des SE</i>	70
9	LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA COMMUNAUTÉ DE COMMUNES DU HAUT- CHABLAIS	76
9.1	INTRODUCTION	76
9.1.1	<i>Contexte</i>	76
9.1.2	<i>Méthode</i>	78
9.2	LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE HAUT-CHABLAIS	79
9.2.1	<i>Un réchauffement global</i>	79
9.2.2	<i>Un réchauffement plus marqué en hiver</i>	80
9.2.3	<i>Un nombre de jours de gel en baisse</i>	83
9.2.4	<i>Des précipitations très variables</i>	83
9.2.5	<i>Une baisse de l'enneigement</i>	85
9.2.6	<i>Autres changements observés sur le territoire</i>	87
9.3	LES ENJEUX TERRITORIAUX EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	88

9.3.1	<i>L'eau : répondre aux besoins et faire face aux risques de crues</i>	88
9.3.2	<i>Des pressions sur la disponibilité en eau</i>	88
9.3.3	<i>Risques de crues, de glissement de terrain et d'érosion</i>	89
9.3.4	<i>Maintien et diversification des activités économiques</i>	90
9.3.5	<i>Tourisme</i>	90
9.3.6	<i>Agriculture</i>	92
9.3.7	<i>Le changement climatique : une opportunité pour développer un nouveau modèle économique pour la vallée ?</i>	93
9.3.8	<i>Préservation de la biodiversité</i>	93
9.3.9	<i>Préservation de la santé et de la sécurité</i>	95
9.3.10	<i>Qualité de l'air</i>	96
9.3.11	<i>Maintien d'un équilibre au sein du territoire</i>	96
9.3.12	<i>Gouvernance : construction collective du territoire</i>	97
9.3.13	<i>Production et consommation d'énergie</i>	97
9.4	CONCLUSIONS.....	97
10	LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LE PARC NATUREL DU MASSIF DES BAUGES ..	99
10.1	INTRODUCTION	99
10.2	LES EFFETS DU CHANGEMENTS CLIMATIQUE SUR LE PNR DU MASSIF DES BAUGES	99
10.2.1	<i>Un réchauffement global</i>	99
10.2.2	<i>Un nombre de jours de gel en baisse</i>	101
10.2.3	<i>Des précipitations très variables</i>	102
10.2.4	<i>Une baisse de l'enneigement</i>	104
10.2.5	<i>Des débits d'eau plus faibles dans le Chéran</i>	106
10.2.6	<i>En conclusions</i>	107
10.3	LE RESSENTI DES ACTEURS DU TERRITOIRE PAR RAPPORT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	107
10.3.1	<i>Atelier risques et biodiversité</i>	107
10.3.2	<i>Atelier agriculture</i>	108
10.3.3	<i>Atelier forêt</i>	109
10.3.4	<i>Atelier tourisme</i>	110
10.3.5	<i>Hiérarchisation des effets :</i>	112
10.3.6	<i>Conclusions</i>	112
11	LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE HOMOGÈNE DE PINEROLO	113
11.1	INTRODUCTION	113
11.2	ETUDES ET RECHERCHES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE DU PINEROLO.....	113
11.2.1	<i>Indicateurs climatiques</i>	114
11.2.2	<i>Indicateurs d'impact</i>	118
11.3	LA PERCEPTION DES IMPACTS	121
11.3.1	<i>Les résultats de l'enquête</i>	122
12	CONCLUSIONS	128

13	BIBLIOGRAPHIE.....	129
----	--------------------	-----

INTRODUCTION

Dans le cadre du projet ARTACLIM, l'activité 3.1 prévoit l'élaboration de l'état de l'art i) des connaissances sur les impacts du changement climatique sur le territoire étudié dans le projet, et ii) de l'intégration des mesures d'adaptation au changement climatique en relation avec ces impacts dans les outils d'aménagement du territoire.

Le résultat attendu de cette activité est un document qui permet, d'une part, de comprendre - et de faire connaître - quels sont les impacts spécifiques du changement climatique qui peuvent être prévus sur les différents contextes territoriaux pris en compte dans le projet en relation avec les secteurs identifiés (risques naturels, agriculture, biodiversité, forêts, systèmes de peuplement et tourisme) et, d'autre part, d'indiquer comment inclure plus efficacement des mesures pour s'adapter à ces impacts dans les pratiques d'aménagement du territoire, sans répéter les erreurs commises jusqu'à présent. Cette analyse est utile pour fournir des recommandations et des suggestions pour les activités du WP 3.2 (indicateurs) et 3.3 (études de vulnérabilité territoriale) ainsi que les activités du WP 4.1 (formation) et 4.2 (définition des stratégies de planification).

Le dossier de candidature ARTACLIM prévoit que le produit de l'activité 3.1 soit articulé en deux parties :

- a) un état de l'art (3.1a) de la recherche sur **les impacts du changement climatique en référence aux secteurs d'activité humaine (risques naturels, agriculture, biodiversité, forêts, systèmes de peuplement et tourisme) et aux contextes territoriaux (périurbains, zones agricoles, zones forestières, zones de moyenne montagne)** pris en compte dans le projet ARTACLIM. Cet état de l'art est élaboré à travers la collecte, l'analyse et la restitution d'études académiques et des résultats de projets de recherche nationaux et internationaux déjà réalisés sur le thème du changement climatique ;
- b) un état de l'art (3.1b) de la recherche sur **l'intégration des mesures d'adaptation au changement climatique dans l'aménagement du territoire**. Cet état de l'art est le résultat d'un travail en plusieurs étapes : l'étude des bonnes pratiques déjà intégrées dans les outils de planification (*best practices*) ; l'analyse des systèmes de planification actuels en Italie et en France ; et enfin, une toute nouvelle analyse des barrières qui ont jusqu'à présent limité l'adoption généralisée de mesures d'adaptation au changement climatique dans ces outils.

Ce document est le produit 3.1a : l'état de l'art de la recherche sur les impacts du changement climatique. Il est structuré de la manière suivante : le chapitre 1 résume les principaux scénarios de changement climatique prévus dans les Alpes. Les six chapitres qui suivent illustrent les impacts du changement climatique qui, dans la littérature scientifique, ont été identifiés comme actuels ou potentiels sur des territoires alpins similaires aux études de cas ARTACLIM, en référence respectivement aux risques naturels, à l'agriculture, à la biodiversité, aux forêts, aux systèmes de peuplement et au tourisme. Le chapitre 8 met en évidence et résume les risques intersectoriels qui ressortent des chapitres précédents et montre comment l'évaluation des services écosystémiques peut fournir un cadre utile pour la prise en compte de ces impacts. Enfin, les chapitres 9, 10 et 11 font le point sur les impacts du changement climatique, analysés dans la première partie du document, qui ont été trouvés jusqu'à présent dans les trois territoires qui constituent les études de cas du projet ARTACLIM.

1. LES SCÉNARIOS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES ALPES

1.1 INTRODUCTION

Cette première partie vise à reprendre les éléments essentiels de la littérature internationale sur les scénarios climatiques internationaux et la déclinaison qui a pu être faite de ceux-ci à l'échelle des Alpes.

Il s'agit de fournir au lecteur les acquis sur cette question, tout en étant informé des limites de ce savoir qui ne fait qu'évoluer grâce à la mobilisation des communautés scientifiques et des acteurs des territoires sur le plan national et international. Il constitue une des parties d'un document plus large élaboré dans le cadre du projet Interreg ARTACLIM visant à faire le bilan des connaissances scientifiques sur les effets du changement climatique dans les Alpes.

1.1.1 QUELQUES DÉFINITIONS

En préambule, il nous semble important de pouvoir rappeler quelques notions essentielles en lien avec notre sujet.

Système climatique correspond à l'ensemble Terre-Atmosphère. Il évolue au cours du temps sous l'effet de processus internes et de contraintes externes, d'origine naturelle ou humaine. L'état du système climatique est lié aux interactions entre l'atmosphère, les surfaces continentales, l'hydrosphère (océans, rivières, lacs, nappes souterraines), la cryosphère (calottes glaciaires, glace de mer, manteau neigeux) et la biosphère (tous les organismes vivants (faune et flore) sur terre, dans les océans et dans l'air). Ce sont ces interactions multiples qui expliquent la complexité du système.

Changement climatique & Changement global : le changement climatique correspond à une modification durable (i.e. supérieure à 10 ans) des paramètres statistiques du climat global de la Terre. Le changement global est une notion plus large qui englobe les évolutions climatiques mais également les modifications environnementales induites par les usages anthropiques (urbanisation, déforestation, ...) et les mutations socio-économiques. Souvent, par abus de langage, on emploie le terme "changement climatique" à la place de "changement global".

GIEC : le **Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC)** (en anglais IPCC pour *Intergovernmental Panel on Climate Change*) est un organisme intergouvernemental, ouvert à tous les pays membres de l'ONU. Il « a pour mission d'évaluer, sans parti-pris et de façon méthodique, claire et objective, les informations d'ordre scientifique, technique et socio-économique qui nous sont nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au réchauffement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Il n'a pas pour mandat d'entreprendre des travaux de recherche ni de suivre l'évolution des variables climatologiques ou d'autres paramètres pertinents. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue ».

Scénarios RCP (Representative Concentration Pathway) sont les quatre scénarios relatifs à l'évolution de la concentration en gaz à effet de serre au cours du XXI^e siècle, établis par le GIEC.

Les modèles climatiques sont des modèles numériques qui résolvent les équations de la physique. Ils intègrent les différentes composantes nécessaires à la représentation du climat et des rétroactions entre les différentes composantes du système climatique. Deux types de modèles existent :

- Les modèles climatiques globaux (GCM pour *Global Circulation Model*) fournissent des informations climatiques à l'échelle planétaire, à une résolution d'environ 100km.

- Les modèles climatiques régionaux (RCM pour *Regional Climate Model*) sont centrés sur des régions spécifiques (Alpes ; Europe ; Afrique de l'Ouest ; etc...), et fournissent des informations climatiques à plus haute résolution (i.e. 10-25km).

Echelle climatique régionale : elle s'applique à des régions de plusieurs milliers de kilomètres carrés, soumises à des phénomènes météorologiques bien particuliers (des vents régionaux, par exemple) du fait de l'interaction entre la circulation générale et le relief (e.g. Climat régional Alpin).

CORDEX (Coordinated Regional climate Downscaling EXperiment) : programme du WCRP (World Climate Research Programme) de l'Organisation Mondiale de la Météorologie, il a pour objectif de coordonner les recherches et les applications liées à la régionalisation du climat afin de fournir des informations aux échelles pertinentes pour étudier les effets du changement global et de proposer des scénarios d'adaptation. CORDEX coordonne actuellement un programme visant à fournir des simulations climatiques régionales à très haute résolution (i.e. 2-6 km).

Simulation d'ensemble : au lieu de faire une seule simulation climatique (régionale) du climat passé ou futur probable, un ensemble de simulations est produit. Cet ensemble a pour objectif de donner une indication de la gamme de variabilité du climat la plus probable. Cette approche est souvent proposée pour prendre en compte deux sources d'incertitude dans la prévision : l'erreur associée à la condition initiale imparfaite, erreur qui peut être amplifiée par la nature chaotique du système climatique, et ii) l'erreur liée à la nature même du modèle, dans sa formulation mathématique et/ou des conditions de forçages futurs. Les simulations d'ensemble s'appuient soit sur un ensemble avec le même modèle soit avec un ensemble de plusieurs modèles différents, on parle alors multi-modèles".

1.1.2 LES SCÉNARIOS SOCIO-ÉCONOMIQUES DU GIEC

Afin d'évaluer les évolutions futures du système climatique et d'anticiper les éventuels effets de ces changements sur les milieux terrestres et marins, les modèles climatiques globaux sont alimentés par des conditions de forçages estimées pour représenter "au mieux" ce que pourraient être les émissions de gaz à effet de serre (GES). C'est ce qu'on appelle les scénarios. La méthode d'élaboration de ces scénarios a évolué.

Apparus dans le 3ème rapport du GIEC en 2001, les scénarios ont tout d'abord été élaborés à partir d'éléments de réflexion sur les futurs possibles de nos sociétés et de nos modes de vie. Ils s'appuyaient sur l'évolution démographique, le développement économique et social et le rythme et la direction de l'évolution technologique, décrits comme "forces motrices" des trajectoires d'émissions des GES. Schématiquement, les scénarios étaient représentés dans un tableau à double entrée (Objectifs Economiques - Objectifs Environnementaux ; Développement Mondialisé - Développement régionalisé) permettant d'identifier 4 grandes familles (Tab.1) (IPCC, Moss et al., 2008).

	Objectifs plus économiques	Objectifs plus environnementaux
Globalisation (développement mondial harmonisé)	<p style="text-align: center;">A1 Croissance économique rapide 1.4 - 6.4°C</p> <ul style="list-style-type: none"> - Croissance économique très rapide ; - Population mondiale : maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite ; - Introduction de nouvelles technologies plus efficaces ; - Convergence entre régions, renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, réduction des différences de revenus entre régions ; - Evolution technologique dans le système énergétique : <ul style="list-style-type: none"> - Forte intensité de combustibles fossiles (A1FI) - Sources d'énergie autres que fossiles (A1T) - Equilibre entre les sources (A1B) 	<p style="text-align: center;">B1 Durabilité Environnementale Globale 1.1 - 2.9°C</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monde à la géopolitique convergente - Population mondiale : maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite - Orientation vers une économie de services et d'information => une utilisation des matériaux plus efficiente - Accent mis sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité mais sans initiative supplémentaire pour gérer la question climatique
Régionalisation (disparités régionales, gouvernantes mondiales peu harmonisées)	<p style="text-align: center;">A2 Développement économique 2.0 - 5.4°C</p> <ul style="list-style-type: none"> - Monde très hétérogène - Autosuffisance, préservation des identités locales - Accroissement continu de la population - Développement économique régional. La croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentés et plus lentes que dans les autres scénarios 	<p style="text-align: center;">B2 Durabilité environnementale locale 1.4 - 3.8°C</p> <ul style="list-style-type: none"> - Accent mis sur des solutions locales pour la viabilité économique, sociale et environnementale - Accroissement de la population mondiale continue mais moins fort que dans A2 - Evolutions technologiques moins rapides et plus diverses que dans A1 et B1. - Scénarios orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale mais axés sur des niveaux locaux et régionaux.

TABLE 1 : DESCRIPTION DES 4 SCÉNARIOS SOCIO-ÉCONOMIQUES DU GIEC.

Le rapport du GIEC de 2013 (AR5 ; IPCC, 2013) introduit une nouvelle méthode d'élaboration de scénarios à travers les scénarios RCP (pour « Representative Concentration Pathway », soit « Profils représentatifs d'évolution de concentration »).

Les quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (RCP) retenus par les experts du GIEC pour le 5ème Rapport ont été traduits en termes de forçage radiatif, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Le bilan radiatif représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge ré-émis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, comme par exemple la concentration en gaz à effet de serre, ce bilan se modifie : on parle de forçage radiatif.

Les 4 profils RCP correspondent chacun à une évolution différente de ce forçage à l'horizon 2300. Ils sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m^2 (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe. Parmi les données annexes à ces prévisions, la couverture neigeuse globale planétaire est amenée à diminuer de minimum 7% (scénario le plus optimiste) jusqu'à 25% (scénario le plus pessimiste).

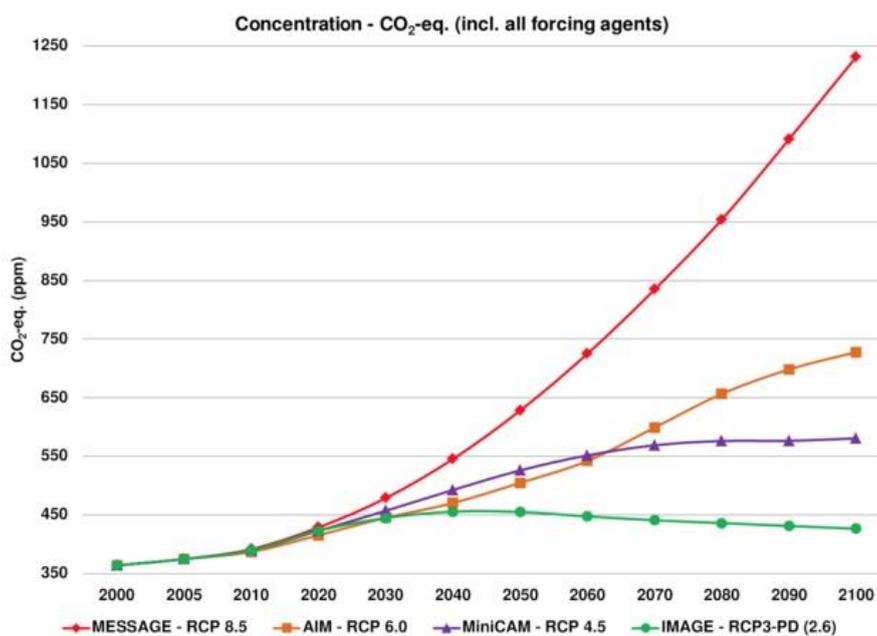


FIGURE 1 : EQUIVALENT CO2 DU FORÇAGE ATMOSPHÉRIQUE (EN PPM) SELON LES 4 SCÉNARIOS RCP DU RAPPORT DU GIEC, AR5.

Des liens existent entre les deux types de scénarios. On note ainsi que :

- Les RCP couvrent une période plus longue : jusqu'à 2300 (2100 pour les anciens scénarios).
- Le profil RCP 8.5 est le plus extrême (pessimiste). Il est un peu plus fort que le scénario le plus marqué dans les premiers scénarios (A2).
- Les profils RCP 6.0 et RCP 4.5 correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios A1B et B1.
- Enfin, le profil RCP 2.6 est sans équivalent dans les anciennes propositions du GIEC car il intègre des effets de politiques de réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à 2°C (meteofrance.fr).

1.1.3 DU GLOBAL AU RÉGIONAL

Compte tenu de la topographie particulièrement marquée des Alpes, l'étude du système climatique et de son évolution nécessite l'utilisation de modèles climatiques régionaux, dont la résolution est de l'ordre de 25km. Ces modèles sont forcés par les GCM, ce qui entraîne une propagation des incertitudes supplémentaires à celles de la scénarisation du futur. Pour encadrer au mieux ces incertitudes, la communauté internationale s'appuie sur des simulations d'ensemble. Par exemple, Gobiet et al. (2014) présentent dans leur revue sur l'évolution climatique dans les Alpes au cours du XXIème siècle l'évolution de la température présentant plus d'un degré de variabilité autour de la valeur moyenne, et ce quelque soit le scénario proposé (Fig.2).

Plusieurs projets (Table 2) ont permis l'élaboration de telles simulations qui permettent aujourd'hui d'avoir une représentation de l'évolution passée et future du système climatique à l'échelle des Alpes.

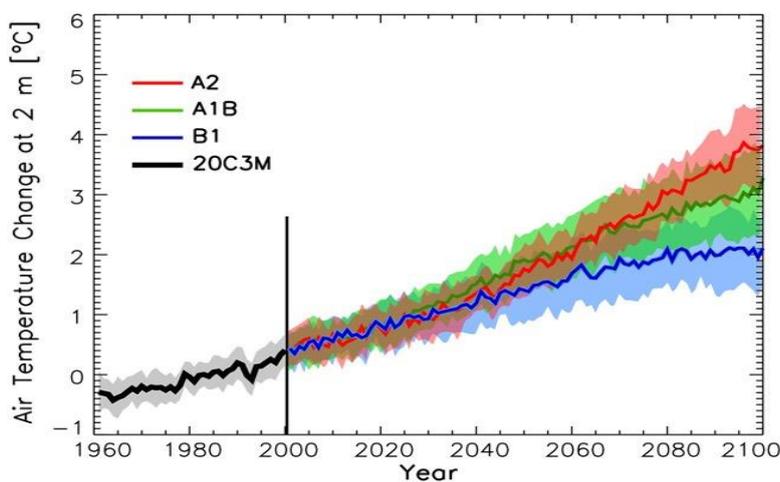


FIGURE 2: EVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE SUR L'EUROPE BASÉE SUR L'EXERCICE CMIP3 DU GIEC. LES LIGNES PLEINES COLORÉES INDIQUENT LES VALEURS MOYENNES MULTI-MODÈLES. D'APRÈS GOBIET ET AL., 2014

Nom du projet	Site web	Principales références
EU/FP7 ACQWA	http://www.acqwa.ch/	Beniston et al., 2011
GICC ADAMONT	http://www.irstea.fr/toutes-les-actualites/departement-territoires/territoires-montagne-changement-climatique-adamont	
GIS Alpes-Jura ClimAdapt	http://www.suaci-alpes.fr/Clim-Adapt	Sérès, 2010
INTERREG ClimChAlp	http://risknat.org/climchalp/	Prudent-Richard et al., 2008
FP6 ENSEMBLES	http://ensembles-eu.metoffice.com/	Hewitt, C.D., 2005
ANR SCAMPEI	http://www.umn-cnrm.fr/scampe/presentation_scampe/index.php	http://www.umn-cnrm.fr/scampe/documents/docs/index.php

TABLE 2 : PRINCIPAUX PROJETS LIÉS À L'ÉTUDE DE L'ÉVOLUTION CLIMATIQUE DANS LES ALPES (LISTE NON EXHAUSTIVE)

1.2 LES OBSERVATIONS : LA SIGNATURE DU CHANGEMENT CLIMATIQUE EST DÉJÀ PRÉSENTE.

Plusieurs structures et/ou observatoires fournissent des observations ou des synthèses sur l'évolution des variables climatiques observées sur les Alpes Françaises. Citons notamment :

L'Observatoire Régional des Effets du Changement Climatique (ORECC), structure de la région Auvergne - Rhône-Alpes, qui a pour objectif le porté à connaissance sur le changement climatique et ses effets, l'élaboration et la mise en œuvre par les acteurs de stratégies d'adaptation, et l'animation sur ces questions. <http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fr/lorecc/fondements.html>

L'Observatoire Savoyard sur le Changement Climatique de l'Agence Alpine de Territoires (AGATE) qui propose des synthèses des évolutions de certains paramètres climatiques (température, précipitation, enneigement) ciblées sur la Savoie. <http://www.mdp73.fr/index.php/9-les-observatoires/7-observatoire-du-changement-climatique>

L'observatoire CRYOBS-CLIM qui fournit les données d'observations sur plusieurs glaciers nationaux et internationaux, et en particulier sur les Alpes. L'évolution des glaciers témoigne de l'évolution du climat. <https://cryobsclim.osug.fr/>

Par ailleurs, plusieurs études ont été réalisées sur ces questions. Citons par exemple :

- Les changements et les Alpes (alpMedia, 2002) ;
- Agence Européenne pour l'Environnement, Changement climatique régional et adaptation. Les Alpes face au changement des ressources en eau (AEE, 2009) ;
- Climat actuel de la région Rhône-Alpes, (Météo-France, 2012)
- Orientations en matière d'adaptation locale au changement climatique dans les Alpes. Convention Alpine (Convention Alpine, 2013).

Les changements du climat alpin sont d'ores et déjà présents, et ce depuis le siècle dernier (Gobiet et al. 2014). Dans ce rapport, seuls quelques éléments sont repris pour illustrer ces changements.

1.2.1 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE

L'accroissement des températures est deux fois plus élevé que la moyenne de l'hémisphère Nord, représentant une augmentation moyenne de la température annuelle d'environ 2°C (Auer et al. 2007). Cet accroissement est relativement homogène et présente, depuis 1980, un taux de réchauffement moyen annuel d'environ 0.5°C par décennie (EEA 2009), principalement lié à l'humidification de l'atmosphère (Philippon 2013). Dans les Alpes françaises, la température annuelle a augmenté d'environ 1°C, sur la période 1958-2002, et ce principalement pendant les décennies 80 et 90 (Durand et al. 2009a). Comme le mentionne Bernard (2017), *ces observations sont principalement dues à l'augmentation des températures minimales journalières* (Moisselin 2002; Beniston 2005). Cependant, cette tendance varie selon l'altitude, les saisons et les régions (Scherrer et al. 2005). Les tendances les plus prononcées sont observées pour les **altitudes comprises entre 1500 et 2000 m** (Durand et al. 2009a). Les massifs plus au nord sont sujets à une augmentation de température variant de +1.5 à 2°C quelle que soit la saison, alors que les massifs plus au sud sont sujets à une forte baisse des températures en début d'hiver (-2°C), suivie d'une légère augmentation en milieu d'hiver et d'une forte tendance à la hausse des températures en fin d'hiver (jusqu'à +3°C), ce qui se traduit par une légère augmentation (+0.5°C) sur l'ensemble de la saison hivernale (Durand et al. 2009a). A des altitudes supérieures, les températures sont restées relativement homogènes.

A titre d'illustration, la Fig.3 présente l'évolution de l'écart des températures moyennes annuelles (en °C, de janvier à décembre) de 1959 à 2016 par rapport à la normale 1961-1990 dans les Alpes du Nord (stations indiquées sur la Fig.3b).

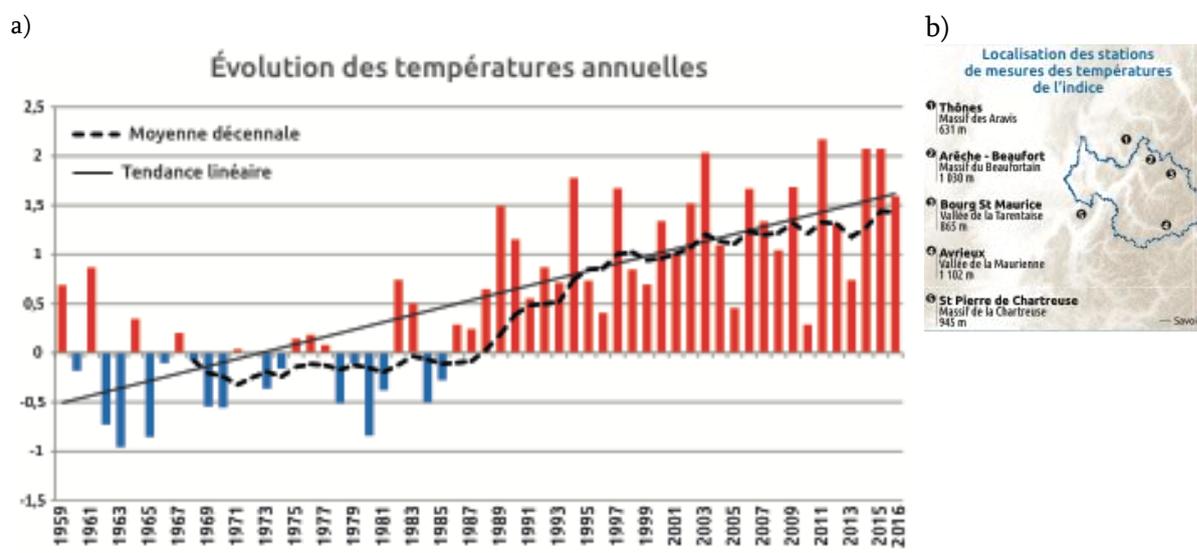


FIGURE 3 : ECART DES TEMPÉRATURES MOYENNES ANNUELLES (EN °C, DE JANVIER À DÉCEMBRE) DE 1959 À 2016 PAR RAPPORT À LA NORMALE 1961-1990 DANS LES ALPES DU NORD (STATIONS INDIQUÉES SUR LA FIG.3B). SOURCE MÉTÉO-FRANCE, RETRAITEMENT AGATE. FIGURE EXTRAITE DU BILAN ANNUEL 2016.

1.2.2 EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS LIQUIDES (PLUIE) ET SOLIDES (NEIGE)

Le lien entre température et régime de précipitations (liquide (pluie) ou solide (neige)) n'est pas direct car d'autres processus à grande échelle (e.g. oscillation Nord-Atlantique) et à plus petite échelle (e.g. effet topographique, processus de formation des précipitations) sont mis en jeu.

A propos des précipitations hivernales dans les Alpes, l'ensemble des études montre une diminution de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord (IPCC 2014) et en particulier pour les Alpes européennes (Schöner et al. 2009). A partir des années 1980, les tendances de diminution de hauteur de neige (Fig.4) et le nombre de jours avec présence de neige au sol sont clairement identifiées principalement à des altitudes basses dans les Alpes françaises (Durand et al. 2009b). Ces tendances en basse altitude peuvent être attribuées à l'augmentation de la température. Au-delà de 1700-2000m, le signal est moins clair même si on observe une diminution des chutes de neige en fin de saison hivernale (Durand et al. 2009b). A l'échelle des Alpes françaises, l'augmentation plus prononcées des températures vers 2000 m (Durand et al. 2009a) entraîne une diminution importante du manteau neigeux (Durand et al. 2009b; Morin et al., 2012) et plus particulièrement en fin d'hiver et début d'été où les augmentations sont les plus prononcées (Durand et al. 2009b).

Concernant la période estivale, les observations montrent clairement la signature du réchauffement climatique sur l'occurrence de valeurs extrêmes de température (Météo-France, 2012) augmentant ainsi la vulnérabilité du territoire alpin aux sécheresses. Cette vulnérabilité a été clairement révélée en 2003, lors de la vague de chaleur qui a touché une grande partie de l'Europe au cours des deux premières semaines d'août (Schär and Jendritzky 2004). Les précipitations extrêmes, comme les précipitations ordinaires (Fig.5) ne présentent pas de tendance avérées (Météo-France, 2012) mais semblent être plus fréquentes dans le futur (Schmidli and Frei 2005).

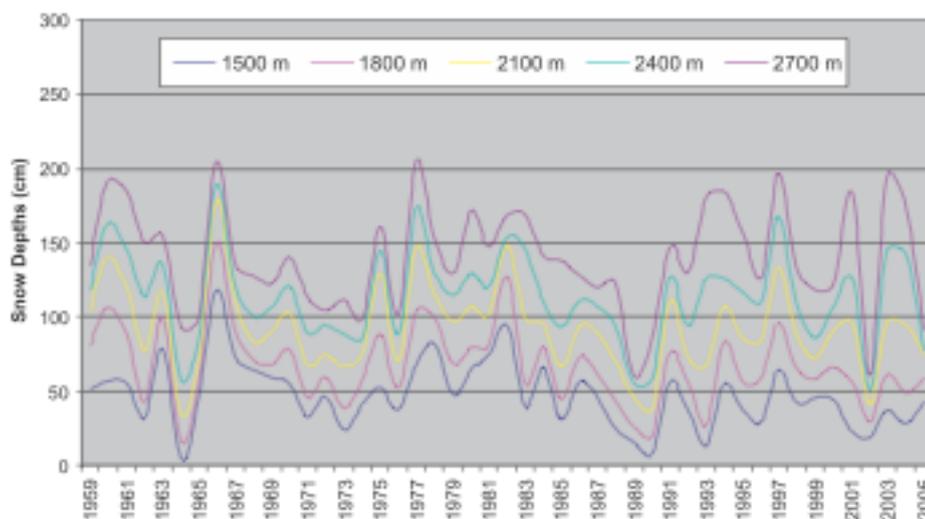
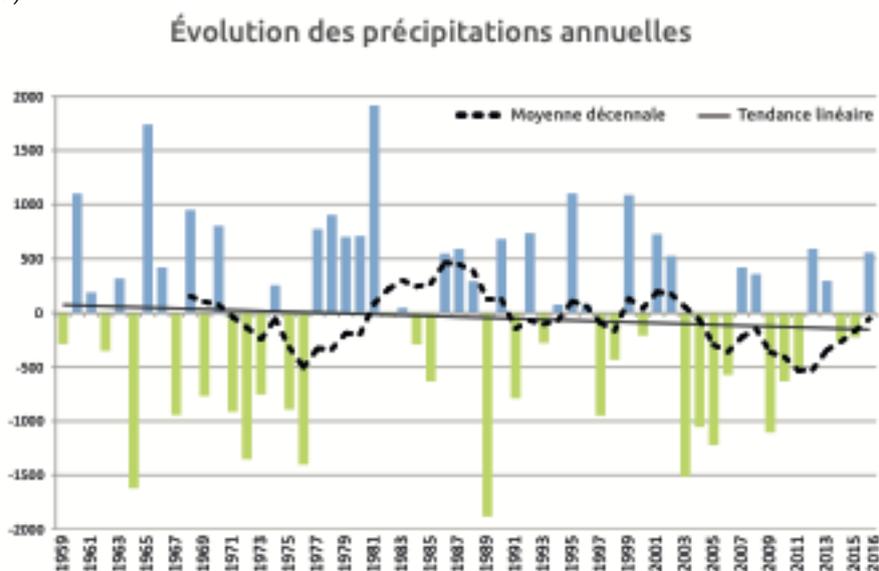


FIGURE 4 : MOYENNE ANNUELLE (DÉCEMBRE-JANVIER-FÉVRIER) DE L'ÉPAISSEUR DE NEIGE À PLUSIEURS ALTITUDES SUR LES ALPES FRANÇAISES. FIGURE EXTRAITE DE DURAND ET AL., 2009B.

a)



b)



FIGURE 5 : ECART DES CUMULS MOYENS ANNUELS DE PRÉCIPITATION (EN MM, DE JANVIER À DÉCEMBRE) DE 1959 À 2016 PAR RAPPORT À LA NORMALE 1961-1990 EN SAVOIE (STATIONS INDIQUÉES SUR LA FIG.5B). SOURCE MÉTÉO-FRANCE, RETRAITEMENT AGATE. FIGURE EXTRAITE DU BILAN ANNUEL 2016.

1.2.3 ÉVOLUTION DES GLACIERS

En moyenne sur le XXème siècle, Huss (2012) observe une diminution du bilan de masse des glaciers alpins. Les glaciers dans les Alpes françaises (Massif de la Vanoise, des Ecrins, du Mont-Blanc) couvraient 369 km² en 1967-1971 et 275 km² sur la période 2006-2009 (Rabatel, 2015; Fig. 6). Cette accélération de la perte des surfaces des glaciers est très inégale suivant le Massif (Fig.4). Ce recul des glaciers alpins est principalement induit par le réchauffement climatique, dans la mesure où aucune tendance significative de précipitations n'est observée sur cette période.

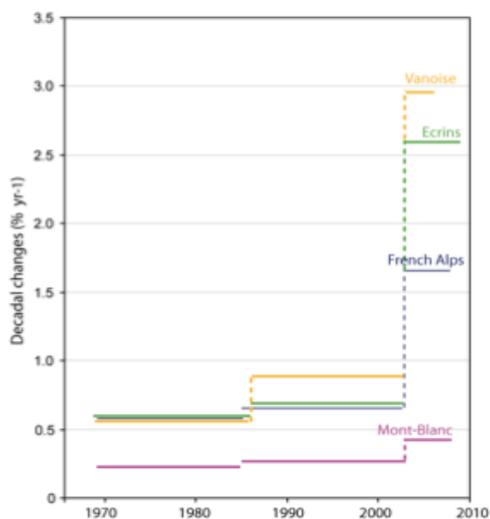


FIGURE 6 : CHANGEMENTS DE L'ÉTENDUE DES GLACIERS DANS LES PRINCIPAUX MASSIFS DES ALPES FRANÇAISES DE 1967-71 À 2006-09, EXPRIMÉS EN % PAR AN.

FIGURE REPRISE DE RABATEL (2015) ISSUE INITIALEMENT DE GARDENT ET AL., 2014.

1.2.4 EVOLUTION DE LA BIODIVERSITÉ

La combinaison de températures plus élevées et de chutes de neige plus faibles en fin d'hiver et au printemps entraîne un amincissement du couvert de neige, une fonte plus précoce et des saisons de croissance plus longues pour les plantes.

1.3 LES PROJECTIONS FUTURES : VERS DES INFORMATIONS AUX ÉCHELLES D'INTÉRÊT POUR LES QUESTIONS D'ADAPTATION.

Les changements d'ores et déjà observés ne feront que s'accroître, au moins jusqu'à 2030-2050, ensuite tout dépendra des trajectoires d'émissions de gaz à effet de serre dans lesquelles les sociétés mondiales seront capables de s'inscrire.

Plusieurs projets (Table 2) ont mobilisé la modélisation climatique régionale pour proposer des scénarios futurs sur les Alpes. Afin de gérer les nombreuses incertitudes associées à ce type d'exercice, les approches multi-modèles et prévision d'ensemble sont encouragées.

Le projet ENSEMBLES, repris dans la synthèse de Gobiet et al. (2014), met à disposition des scénarios d'évolution des principales variables climatiques sur la région des Alpes à la résolution de 25km (Fig.7).

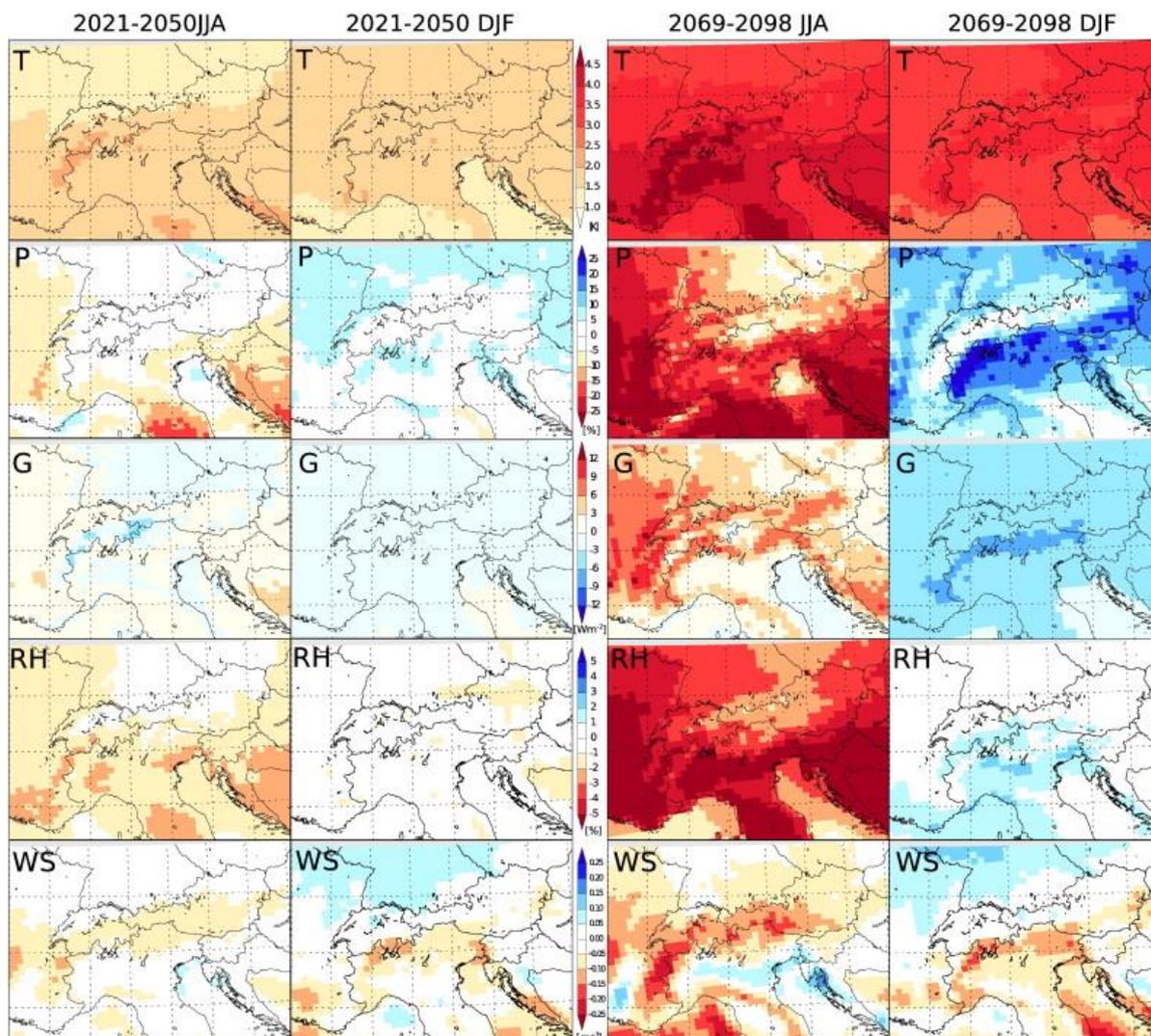


FIGURE 7: DISTRIBUTION SPATIALE DES CHANGEMENTS MOYENS ATTENDUS SUR LES ALPES PAR RAPPORT À LA PÉRIODE DE RÉFÉRENCE 1961-1990, POUR L'ÉTÉ (JJA) ET L'HIVER (DJF). GAUCHE : 2021-2015; DROITE (2069-2098), SCÉNARIO A1B. T: TEMPÉRATURE; P: PRÉCIPITATION; G: RADIATION GLOBALE; RH : HUMIDITÉ RELATIVE; WS : VITESSE DU VENT. (GOBIET ET AL., 2014)

1.3.1 ÉVOLUTION DE LA TEMPÉRATURE

Comme le montre la Fig.7, dans le cadre du scénario A1B, la région alpine va être soumise à un réchauffement marqué (+2°C en 2050; +4°C à la fin du siècle).

C'est dans les parties occidentales des Alpes que les augmentations simulées de températures sont maximales (plus de 4.5°C). Selon des résultats de Modèles Climatiques Régionaux (RCM), les températures moyennes alpines pourraient augmenter au maximum de 3°C à 5°C en hiver et de 4°C à 6°C en été, d'ici à la fin du 21e siècle, en comparaison avec les températures moyennes du 20e siècle. Cette augmentation est plus importante que celle attendue à l'échelle de la France métropolitaine. La moyenne annuelle des températures maximales journalières montre une tendance similaire.

Dans le climat simulé (scénario 2 x CO₂) pour le massif des Écrins, les températures hivernales augmentent plus pour les valeurs minimales que pour les valeurs maximales (jusqu'à + 10°C pour les températures extrêmement basses contre + 3°C pour les températures chaudes).

Pour les autres saisons, le réchauffement est indépendant du caractère minimal ou maximal des températures : + 3°C pour le printemps, + 4°C pour l'été. La conséquence de ce réchauffement s'illustre notamment par une diminution significative du nombre de jours de gel.

1.3.2 EVOLUTION DES PRÉCIPITATIONS SOLIDES ET LIQUIDES

Le rapport de l'agence Européenne pour l'environnement (EEA, 2009), s'appuyant sur les travaux de Lautenschlager et al. (2008), montre que le scénario A1B conduit à des évolutions du cumul annuel de précipitation contrastées sur les Alpes (Fig.8). Les cumuls plus importants seraient présents sur la partie Nord des Alpes alors que la partie Sud serait soumise à un déficit de précipitation. Globalement à l'échelle du massif, les simulations présentent un déficit de précipitation allant de -1% à -11% avec un signal saisonnier marqué (l'été étant la saison présentant le déficit de précipitations le plus marqué).

Associé à l'augmentation de la température, le déficit de précipitations hivernales conduit à des estimations de l'ordre de -36% de précipitations neigeuses en hiver. Même pour des altitudes supérieures à 1500m, les modèles prévoient une réduction d'environ 20% de l'enneigement à la fin de XXIème siècle. Les simulations réalisées par Jacob et al. (2007) suggèrent qu'en dessous de 500m la neige aura totalement disparue (EEA, 2009).

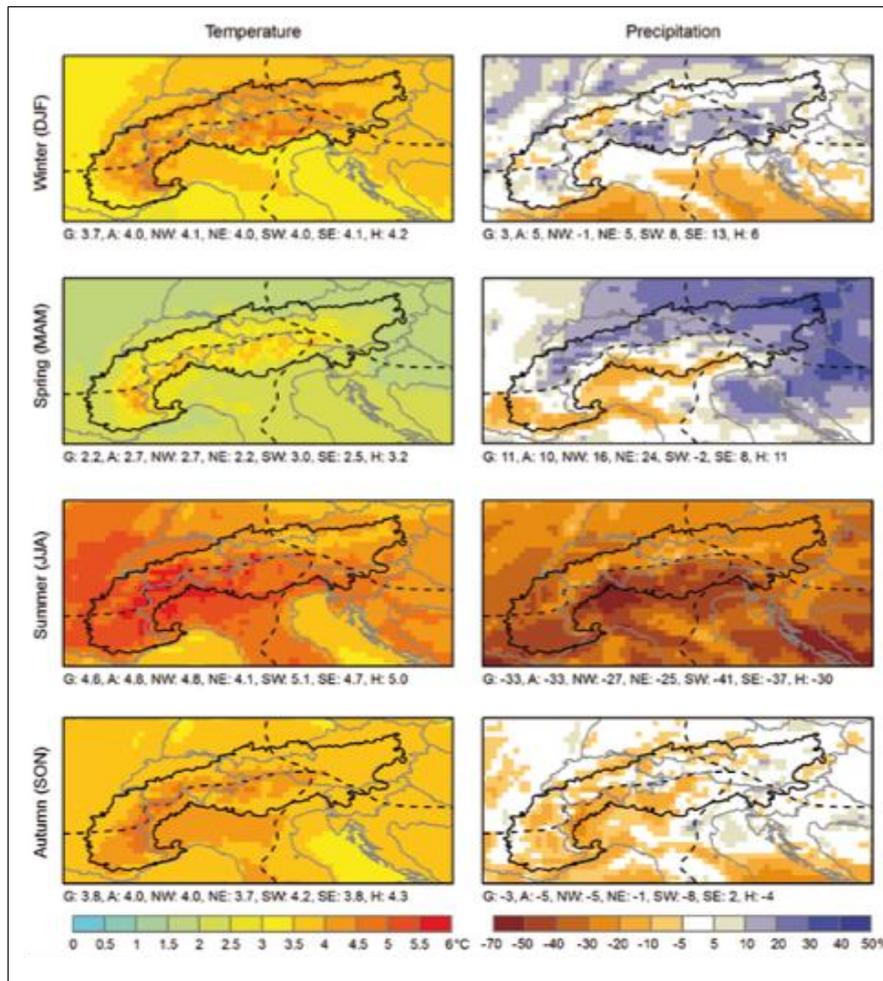


FIGURE 8 : EVOLUTION SAISONNIÈRE DE LA TEMPÉRATURE ET DES PRÉCIPITATIONS À LA FIN DU XXIÈME SIÈCLE POUR LE SCÉNARIO A1B. FIGURE EXTRAITE DE EEA (2009) INITIALEMENT PUBLIÉE PAR LAUTENSCHALGER ET AL. (2008)

1.4 LES LIMITES ET QUESTIONS OUVERTES EN 2017

- Echelles spatiales et temporelles pas tout à fait adaptées aux études sur l'adaptation
- Les incertitudes associées aux projections en particulier en zone de montagne.
- Le besoin d'observation participative pour documenter des altitudes où il est difficile de maintenir des réseaux d'observations conventionnels.
- Peu/pas d'information sur la composition chimique de l'air

2 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES RISQUES NATURELS DANS LES ALPES

2.1 INTRODUCTION

Les territoires alpins sont particulièrement concernés par les impacts du changement climatique sur les risques naturels (Beniston *et al.*, 1996), dans un contexte de changement global à la fois environnemental, social et économique (Boudières *et al.*, 2013).

Les risques en montagne résultent en effet de la présence conjuguée :

- d'aléas hydro-géologiques nombreux, complexes, intenses et rapides (avalanches, crues et laves torrentielles, glissements de terrain, éboulements et chutes de blocs, séismes) pour partie aggravés par le changement climatique, qui se traduit également par une extension, voire l'apparition de risques nouveaux, tels que les risques d'origine glaciaire et périglaciaire ou les incendies de forêts,
- de formes spécifiques de vulnérabilité, à la fois directe (matérielle) et indirecte (fonctionnelle), liées à une forte exposition des enjeux, en particulier de structures et fonctions essentielles au fonctionnement du territoire telles que les réseaux de transport, d'énergie et de télécommunication.

Dans les Alpes européennes, les dommages causés par les risques naturels entre 1982 et 2005 ont ainsi engendré quelque 57 milliards EUR de pertes économiques (OCDE, 2007).

Et malgré les efforts et investissements très importants réalisés au cours des dernières décennies pour construire des ouvrages de protection et tenter de réduire la vulnérabilité des enjeux, on observe une augmentation continue des coûts générés par l'augmentation du nombre et/ou de l'ampleur des aléas naturels dans les régions alpines (PLANALP, 2012).

Bien que l'influence du climat sur la recrudescence d'événements majeurs ne puisse être établie de manière quasi certaine, à l'exception de rares cas (ex. catastrophe de Bondo en août 2017), cette augmentation des dommages et des pertes s'inscrit dans un contexte d'évolutions climatiques importantes en montagne, qui influencent l'activité des aléas naturels, que ce soit en termes d'intensité, de fréquence, de saisonnalité ou de localisation (ONERC, 2008). De plus, il apparaît très probable que l'intensité et la fréquence des événements extrêmes et des aléas majeurs augmentent dans le futur (GIEC, 2013).

On assiste ainsi au développement de nouveaux enjeux associés aux impacts du changement climatique sur certains phénomènes naturels, résultant de l'évolution du climat dans les Alpes (Convention alpine 2012 ; Einhorn *et al.* 2015 ; ORECC 2016 ; EEA 2017b).

La nature et l'ampleur de ces impacts varient en fonction des différentes régions alpines et de la géographie particulière des territoires considérés. Si, en haute montagne, le lien entre le réchauffement et la recrudescence de certains phénomènes est de mieux en mieux établi (cf. infra), il apparaît moins univoque ou plus complexe dans les zones de moyenne montagne et dans les zones métropolitaines adjacentes.

De ce point de vue, le projet ARTACLIM présente l'intérêt de considérer différents types de territoires de moyenne montagne et de piémont aux contextes et problématiques diversifiées en matière de risques naturels, au sein de la zone transfrontalière.

2.2 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUES SUR LES RISQUES NATURELS DANS LES ALPES

Un grand nombre de projets de coopération transnationale et transfrontalière passés et en cours sont consacrés à la connaissance et à la gestion des impacts du changement climatique sur les risques naturels dans l'espace alpin (Einhorn *et al.* 2015 ; PARN, 2017).

Le présent état de l'art s'appuie sur les résultats de ces projets et plus particulièrement sur la base de connaissances du portail Alpes-Climat-Risques¹, développée par le PARN dans le cadre du projet ClimChAlp (Vengeon, 2006) jusqu'à aujourd'hui. Cette base de connaissances bibliographique propose une analyse et des synthèses des observations et projections portant sur : (1) l'évolution des paramètres climatiques, (2) leurs effets sur le fonctionnement des systèmes physiques et (3) les effets induits sur l'activité des aléas naturels (Fig. 1).

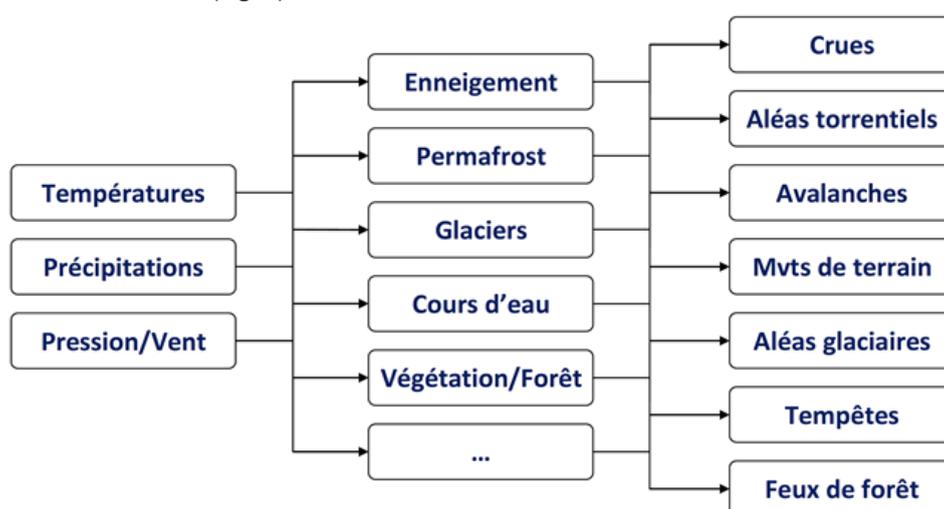


FIGURE 1 : THÉMATIQUES RELATIVES AUX IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT ET LES RISQUES NATURELS ALPINS, ANALYSÉES DANS LA BASE DE CONNAISSANCE « ALPES-CLIMAT-RISQUES ».

Elle comporte également un inventaire des « événements remarquables »² d'aléas et de risques naturels survenus ces dernières années dans les Alpes et présentant un lien supposé ou avéré avec les impacts du changement climatique, tels que des situations météo-climatiques particulières ou des évolutions environnementales de plus long terme (Einhorn et Gérard 2017).

2.2.1 ÉVOLUTION DES FACTEURS DE CONTRÔLE DES ALÉAS

Différents facteurs de contrôle des aléas naturels entrent en jeu, en premier lieu l'augmentation générale et particulièrement prononcée des températures dans les régions de montagne, ainsi qu'une augmentation de la variabilité intra-saisonnière, à l'origine d'une transformation des aléas (Beniston, 2005 ; Einhorn *et al.*, 2015).

¹ <http://www.risknat.org/alpes-climat-risques/>

² http://www.risknat.org/alpes-climat-risques/Base_de_connaissances/Evenements_remarquables.html

2.2.1.1 TEMPÉRATURES

Les Alpes connaissent depuis la fin du XIX^{ème} siècle une augmentation importante des températures, qui aujourd'hui sont plus élevées de 2°C en moyenne. Cette augmentation s'est produite en deux étapes, avec un premier pic dans les années 1950 et une deuxième augmentation à partir des années 1980 (Auer *et al.*, 2007). La région alpine enregistre, sur cette période, une augmentation moyenne des températures deux fois plus importante que celle enregistrée dans l'hémisphère nord.

L'évolution climatique devrait se poursuivre tout au long du XXI^{ème} siècle en s'accroissant. En effet, alors que les températures évoluaient jusqu'alors en suivant une augmentation de 0.25°C par décennie, le réchauffement devrait s'accroître (Gobiet *et al.*, 2014) et atteindre 0.36°C par décennie dans la seconde moitié du siècle. Les périodes actuelles de canicule estivale ou d'hiver très chauds devraient ainsi devenir normales d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (Ouzeau *et al.*, 2014 ; Ouzeau *et al.*, 2016).

2.2.1.2 PRÉCIPITATIONS

A ces changements de températures s'ajoutent des modifications dans le régime des précipitations. A l'échelle de la grande région alpine, on observe au cours du 20^e siècle une tendance opposée entre la partie nord-ouest de la région alpine où les précipitations annuelles ont augmenté de 9% et sa partie sud-est où elles ont diminué également de 9% (Auer *et al.*, 2007).

Concernant les pluies intenses, aucune tendance générale n'est mise en évidence à l'échelle du massif dans son ensemble. Dans certaines régions cependant, une augmentation de leur intensité et/ou de leur fréquence est localement observée. C'est le cas dans le sud-est de la France, sur une partie des Alpes du Sud, où une augmentation des pluies extrêmes s'est produite à partir des années 1980 (Blanchet *et al.*, 2016).

2.2.1.3 ENNEIGEMENT

Les principaux résultats obtenus confirment la forte variabilité spatiale et temporelle du couvert neigeux modélisé en ce qui concerne certains paramètres clés tels que ceux qui décrivent l'emprise au sol ou l'épaisseur de neige. Les paramètres d'enneigement dans les Alpes françaises se caractérisent par un gradient marqué déclinant depuis les contreforts nord-ouest vers les régions internes du sud-est. Cela s'applique principalement à la fois à la durée du manteau neigeux et à l'épaisseur de neige qui montre une variation temporelle principalement négative sur la période d'étude 1959–2005, plus importante à basse altitude, en particulier au nord et durant les derniers hivers, tandis que le sud présente des variations moins marquées (Durand *et al.*, 2009).

2.2.1.4 BILAN HYDRIQUE

Associée à l'augmentation des températures, cette évolution entraîne une sensibilité accrue du réseau hydrique aux extrêmes climatiques (EEA 2017a). On observe ainsi des déficits hydriques de plus en plus importants à partir des années 90 et des sécheresses plus marquées en 2003, 2005, 2009, 2012, 2015 et aux printemps 2004 et 2011. La diminution des bilans hydriques est particulièrement marquée en automne et en hiver.

2.2.1.5 FORÊTS ALPINES

Outre le réchauffement des températures, le stress hydrique a un impact important sur les forêts de montagne et de moyenne montagne et cause une modification des espèces implantées, notamment en dessous de 1000m avec la disparition des essences les moins tolérantes à la sécheresse (épicéa, pin sylvestre), qui, associée au développement d'attaques d'insectes et d'espèces pathogènes va entraîner de nouvelles contraintes en termes d'adaptation forestière (ADAMONT, 2018b). Par ailleurs, les événements extrêmes (tempêtes, incendies) peuvent profondément endommager les forêts et ainsi compromettre voire supprimer leur fonction de protection contre les risques naturels.

2.2.2 IMPACTS SUR L'ACTIVITÉ DES ALÉAS

2.2.2.1 AVALANCHES DE NEIGE

Malgré une baisse attendue du nombre de départs spontanés d'avalanche, du fait de la raréfaction globale de l'enneigement en montagne (Rousselot et al., 2012), on s'attend également à une évolution de la saisonnalité des types de départs, sous l'effet du réchauffement, qui pourrait se traduire par une généralisation des conditions propices aux départs spontanés de neige humide, même au cœur de l'hiver (Castebrunet et al., 2014).

En termes de risque, l'augmentation de l'activité avalancheuse humide pourrait contrebalancer le « recul » global des altitudes atteintes (les avalanches humides peuvent parcourir des distances très importantes). De même, ces dernières sont susceptibles de générer des pressions d'impact nettement plus élevées que celles prédites pour des écoulements froids et secs (Naaïm et al., 2016). Cependant, la propagation des avalanches de neige humide ou de plaques est sensible au relief, au couvert forestier et à la sensibilité de la zone à l'érosion (ONERC 2008). La connaissance actuelle du comportement mécanique de la neige humide reste cependant trop limitée pour quantifier précisément l'impact de ces tendances sur l'exposition des personnes et des biens (ANENA, 2015).

2.2.2.2 CRUES ET INONDATIONS

Les modèles climatiques prévoient une augmentation des précipitations à certaines périodes de l'année et une diminution des précipitations à d'autres périodes de l'année. On s'attend alors à ce que l'évolution des crues suive celle des précipitations. Or le comportement non linéaire de la relation pluie-débit et une série d'effets tampons peuvent atténuer l'impact des précipitations sur les bassins versants vastes (ONERC, 2008).

On observe une augmentation de l'intensité et de la fréquence des inondations dans certaines régions des Alpes. On s'attend, dans le futur, à une augmentation des crues hivernales ainsi qu'à de très bas débits en été. Les rivières à régime nival et glaciaire connaissent une augmentation de l'intensité et du volume de leurs crues et une évolution de leur saisonnalité, avec une onde de fonte plus précoce et longue (Bard et al 2012). La fonte des neiges plus précoce jouera, en particulier, un rôle sur la temporalité des pics de crues au printemps. Cependant, le recul et les observations manquent pour établir des conclusions fermes (ADAMONT, 2018a).

2.2.2.3 COULÉE DE DÉBRIS ET LAVES TORRENTIELLES

Au cours des dernières années on a pu observer une augmentation de l'altitude de départ des coulées de débris qui se font plus rares dans certaines zones de moyennes altitudes. Le retrait des glaciers, à l'origine de la libération de stocks sédimentaires importants, associé au développement d'événements de précipitations intenses pourrait entraîner l'augmentation du transport solide torrentiel dans les bassins

versants d'altitude. A l'inverse, le développement du couvert forestier a plutôt tendance à limiter la fourniture sédimentaire et le transport solide.

On note un accroissement des aléas torrentiels sur deux périodes en particulier. Tout d'abord au printemps (mai, juin, juillet) lors d'épisode orageux localisés brefs et intenses qui s'ajoutent à des bassins versants saturés par la fonte de neige et des glaciers. Ensuite, en automne (fin août septembre, octobre) lors d'épisodes plus généralisés et plus longs qui tombent sur un sol plus sec (ONERC, 2008).

Pour les laves torrentielles la tendance est double (Einhorn et al., 2015). L'analyse statistique de plus de 500 événements répertoriés depuis 1970 dans la base de données du RTM a montré le rôle essentiel joué par les variables climatiques à l'échelle régionale dans la probabilité d'occurrence des laves torrentielles. Dans certains secteurs, l'augmentation de la fréquence des laves torrentielles depuis la fin des années 1980 (Jomelli et al. 2015) serait un effet du réchauffement estival qui entraîne plus d'effets convectifs et donc d'orages estivaux. Dans d'autres secteurs, le contrôle de la temporalité des laves torrentielles par celle de la recharge sédimentaire paraît l'emporter sur son contrôle par le climat (Garitte et al., 2007).

Dans un futur proche, on devrait observer l'inactivité des zones de déclenchement, des coulées de débris, les plus basses, situées à environ 1850m. En effet, cette modification serait la conséquence de la diminution du nombre de jours de gel d'une part et de la remontée en altitude du couvert forestier d'autre part. L'importante augmentation des températures au cours du 21ème siècle va être à l'origine d'une élévation d'au moins 400m (en considérant un taux de 0.65°C/100m) de l'isotherme 0°C. Ce changement va réduire le nombre de jours de gel aux altitudes plus basses et entraîner l'élévation de la limite supérieure des arbres, augmentant par conséquent l'altitude de déclenchement des zones de déclenchement des coulées de débris (Jomelli et al., 2009).

2.2.2.4 MOUVEMENTS DE TERRAIN

- Eboulements et chutes de blocs

Les observations effectuées par les équipes grenobloises dans les falaises calcaires bordant le massif de la Chartreuse ont mis en évidence l'influence notable mais cependant partielle des facteurs météorologiques sur les chutes de pierre, des cycles gel-dégel et/ou des précipitations intenses étant impliqués dans environ la moitié des déclenchements observés (D'Amato et al., 2016).

L'augmentation des précipitations et la remontée de la ligne de neige devrait entraîner une augmentation des chutes de blocs et des glissements de terrain à des altitudes de plus en plus élevées. Un nombre accru de chutes de blocs a été observé à de hautes altitudes pendant les canicules estivales de 2003 et de 2015 (Ravel et al., 2017). La déstabilisation des parois et l'augmentation des chutes de bloc en altitude est en partie liée à la dégradation du permafrost. En revanche, même à plus basse altitude, les données sont trop parcellaires, pour permettre de déceler des tendances, hormis sur certains réseaux routiers départementaux, comme en Savoie, où l'on enregistre une augmentation de l'incidence des aléas gravitaires (éboulements/chutes de blocs, glissements et coulées boueuses), en particulier liés à des épisodes de fonte plus fréquents, y compris en plein hiver (Lescurier, 2011).

- Glissements de terrain superficiels

Un accroissement des précipitations intenses est à même de provoquer une recrudescence des glissements de terrains, qui sont souvent dus à des pics de pressions interstitielles. Cette réponse dépendra des caractéristiques d'infiltration propres à chaque site. Les glissements superficiels peuvent être également modifiés par la fonte la transformation des zones d'altitude liée au retrait glaciaire et à la déstabilisation des zones héritées (ONERC, 2008). D'un autre côté, on observe également une remontée de la limite supérieure des forêts s'accompagne d'une revégétalisation des zones d'altitude, en particulier

glaciaires et périglaciaires, entraînant ainsi une stabilisation des zones héritées du retrait de la cryosphère. Ces volumes de matériaux sont potentiellement mobilisables sous forme de coulées de boue en altitude et ce d'autant plus si la pente présente une forte déclivité (ONERC, 2008).

Le constat fait depuis quelques années est une augmentation de l'intensité des phénomènes météorologiques, comme l'illustrent les crues violentes et très localisées de la Valdaine (Isère) en juin 2002, qui ont été un désastre pour le réseau routier, et des traces de cet événement subsistent dans le paysage encore aujourd'hui. On observe des amplitudes thermiques importantes sur des laps de temps très restreint, ce qui paraît être un phénomène assez général (également constaté en Savoie). En conséquence, on a une augmentation apparente des phénomènes de type érosif, avec des épisodes de ruissellement qui entraîne une érosion importante des talus routiers. Les événements de ce type autrefois considérés comme exceptionnels deviennent communs (Le Bidan, 2011).

- Glissements de terrain profonds

Aucune tendance n'a été établie à ce jour concernant les glissements profonds (cf. ONERC, 2008). Cependant, un certain nombre de réactivations de grands mouvements gravitaires alpins ont été observées ces dernières années, en particulier les glissements de terrain déclenchés en mai 2015 dans le Val d'Arly (73) et réactivés par la suite (notamment en janvier 2018), le glissement à l'origine de la fermeture du tunnel du Chambon (38) à partir d'avril 2015, les éboulements survenus au Mont Granier (73) en janvier et au printemps 2016, la réactivation du glissement argileux de L'Harmalière dans le Trièves (38) depuis l'été 2016, ou encore celle du glissement du Pas de l'Ours dans le Queyras (05). La presse régionale rapporte également un grand nombre d'événements de glissements et éboulements de taille plus modestes ayant causé de nombreuses coupures de routes en montagne.

Comme illustré par la crise consécutive à la fermeture de la route Grenoble-Briançon pendant plusieurs suite à l'endommagement du tunnel du Chambon, une augmentation de l'activité des mouvements de terrain et de leurs impacts sur les réseaux de transport est ainsi susceptible d'accroître le risque d'enclavement des vallées alpines par ces phénomènes et d'impacter fortement la vie socio-économique des territoires affectés (isolement, interruption des activités, perte d'image et d'attractivité). Cette question est au cœur des préoccupations locales des élus et des techniciens dans les vallées les plus exposées (PARN, 2018).

2.2.2.5 FEUX DE FORÊTS

Avec l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et des sécheresses, la propension aux feux de forêt augmente dans tout l'arc alpin (projet ALP-FFIRS).

Les observations montrent une expansion des incendies de forêts dans les Alpes françaises, où ils sont à la fois plus fréquents et plus intenses depuis 1959 (Dupire et al. 2017). On note en revanche des changements très contrastés entre Alpes du Nord et Alpes du Sud, avec : (i) une évolution particulièrement importante depuis 1959 dans les Alpes du Sud chaudes et sèches : l'aléa météo feux de forêt est plus fort, (ii) une augmentation élevée dans les Alpes internes et dans les vallées de basse altitude des Alpes du Nord ; (iii) une saison favorable aux feux qui s'allonge au printemps dans les Alpes du Nord, et presque toute l'année dans les Alpes du Sud ; et (iv) des valeurs d'indice forêt météo extrêmes enregistrées chaque année dans le sud et tous les 3-4 ans dans le nord. Sur la base des projections climatiques, on s'attend à une poursuite de ces tendances.

À leur tour, les incendies de forêts peuvent entraîner une recrudescence des phénomènes d'érosion et de chutes de blocs, comme observé après l'été 2003 (ONERC, 2008).

2.2.2.6 ALÉAS LIÉS À LA HAUTE MONTAGNE

Bien que la cryosphère n'entre pas directement dans le cadre de notre étude, les territoires étudiés n'étant pas des territoires de haute-montagne, il est nécessaire de noter que ce milieu est également touché fortement par les modifications des températures et des régimes de précipitation et leurs répercussions sur les risques d'origine glaciaire et périglaciaire (Bodin et al., 2015). En effet, ces zones de hautes sont très connectées avec nos territoires d'étude, que ce soit au niveau du réseau de transport, de l'attractivité touristique et économique qu'au niveau des risques naturels. Ainsi, la fonte des glaciers et du permafrost en altitude et la remobilisation de stocks sédimentaires hérités peuvent jouer un rôle sur les aléas et les risques en plaine et en moyenne montagne à travers les processus de cascade sédimentaire, ou d'apport en eau important lors des pics de fonte. Le projet Alcotra ADAPT-Mont-Blanc³ se concentre plus spécifiquement sur ces problématiques spécifiques des territoires de haute montagne.

2.2.2.7 SYNTHÈSE

Une approche différenciée des régions étudiées (Tab. 1) et basée sur des études locales en lien avec les acteurs du territoire est donc nécessaire pour tenir compte de leurs spécificités.

Par ailleurs, un certain nombre d'impacts intersectoriels émergent de l'analyse, qu'il conviendra de d'approfondir en lien avec les autres tâches du projet (états de l'art sectoriels, études de vulnérabilité).

³ Adaptation de la Planification Territoriale aux changements climatiques dans l'Espace Mont-Blanc.

Modification des risques naturels	Degré de confiance dans les changements projetés	Régions les plus touchées	Importance économique
<u>Risques liés au pergélisol :</u> Augmentation de la fréquence des éboulements et de l'ampleur des laves torrentielles	Très élevé	Haute montagne, zones touristiques	Faible
<u>GLOF :</u> accroissement de l'incidence des inondations par vidange de lacs glaciaires	Très élevé	Haute montagne, zones touristiques	Faible
<u>Autres risques glaciaires :</u> Plus fréquents et plus importants	Élevé	Haute montagne, zones touristiques	Faible
<u>Crues d'hiver :</u> Augmentation en intensité et en fréquence	Moyen	Basse montagne, zones densément peuplées	Très élevée
<u>Orages et tempêtes :</u> Augmentation en intensité et en fréquence	Moyen	Arc alpin, zones densément peuplées	Très élevée
<u>Éboulements de rochers :</u> Plus fréquents	Moyen	Basse et moyenne montagne	Moyenne
<u>Feux de forêts :</u> plus nombreux dans les Alpes du Sud	Moyen	Basse montagne du sud des Alpes	Moyenne
<u>Glissements de terrain et laves torrentielles :</u> Plus fréquents et plus importants	Moyen/Faible	Basse et moyenne montagne	Moyenne
<u>Avalanches :</u> plus fréquentes et plus importantes à haute altitude	Faible	Haute montagne, zones touristiques	Moyenne

TABLEAU 1 : INCIDENCES DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RISQUES NATURELS DANS L'ARC ALPIN (OCDE, 2007)

3 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'AGRICULTURE ALPINE

3.1 INTRODUCTION

Dans la macro-région alpine, environ 18 % des terres sont utilisées pour la culture, tandis que 18 % des terres sont recouvertes d'herbes naturelles ou semi-naturelles, qui sont souvent dédiés aux pâtures. Au total, environ 31,4 % des Alpes, couvrant une superficie de 190 600 km², sont encore utilisées pour la production agricole (Flury et al., 2013).

L'agriculture alpine présente une grande hétérogénéité par rapport :

- aux systèmes de culture (allant de la culture fruitière et viticole dans les zones intérieures sèches, à l'horticulture et à la céréaliculture dans les vallées, à la gestion des prairies et des pâtures pour la production de viande et de produits laitiers) ;
- aux techniques de culture et leur degré d'intensité ;
- à l'ampleur des processus de marginalisation socio-économique et d'abandon des terres.

La variété de modèles d'agriculture qui émerge de ces différences jouent un rôle essentiel dans le maintien des économies de montagne et des paysages culturels alpins, mais en même temps ils ont longtemps fait face à des problèmes liés à une faible productivité et à des coûts de production élevés, résultant de particularités topographiques, pédologiques et climatiques (Mann, 2013).

La vulnérabilité de l'agriculture de haute altitude au changement climatique est donc particulièrement élevée parce qu'elle chevauche des conditions généralisées de grande fragilité structurelle.

3.2 FACTEURS D'IMPACT

3.2.1 HAUSSE DES TEMPERATURES

La tendance à la hausse des températures entraîne l'allongement de la période végétative pour un grand nombre de cultures avec une avance du cycle de culture en printemps et, en particulier pour les boutures d'herbe, sa prorogation en automne.

L'extension de la phase végétative se traduit, lorsqu'aucun autre facteur limitant n'apparaît, par une augmentation des rendements de production (Lavalle et al., 2009).

De plus, ce même phénomène permet l'introduction de cultures sensibles aux basses températures (par exemple la vigne) à des altitudes plus élevées que celles traditionnellement autorisées.

Cependant, la réduction des chutes de neige limitera la fonction protectrice de celle-ci sur la végétation et sur le sol sous-jacent. Les cultures peuvent donc être endommagées par les gelées printanières et automnales. Par exemple, ces événements réduisent la quantité et la qualité du fourrage à court terme, alors qu'à long terme, on peut s'attendre à une dégradation des formations herbacées (Chaix, Dodier, & Nettier, 2017).

En outre, pour les formations semi-naturelles (prairies permanentes et pâtures), les migrations vers des altitudes plus élevées que les espèces sensibles à la hausse des températures entraîneront une modification de la composition spécifique (il semble probable que la culture des graminées diminuera au bénéfice des cultures légumineuses), avec des effets qui ne sont pas encore bien quantifiés, mais significatifs, à la fois en termes de productivité et de qualité du fourrage (Sérès, 2010).

La présence de conditions thermiques plus chaudes peut accélérer la décomposition naturelle de la matière organique (MATTM, 2014). Les sols sont des réservoirs de carbone : ils en contiennent beaucoup plus que l'atmosphère, à tel point que la séquestration du carbone dans les sols agricoles est une action de l'article 3.4 du Protocole de Kyoto. Le transfert du carbone du sol à l'atmosphère, dû à une accélération de la décomposition induite par l'augmentation thermique, pourrait déclencher un mécanisme de rétroaction positive. (Davidson & Janssens, 2006).

La conservation de la teneur en matière organique du sol est d'une importance cruciale d'un point de vue agronomique car elle remplit des fonctions décisives d'un point de vue physico-chimique (amélioration de la structure ; atténuation des défauts résultant d'une texture déséquilibrée ; régulation de la disponibilité et de l'absorption des nutriments).

3.2.2 DES CHANGEMENTS DANS LE RÉGIME DES PLUIES

Si l'on considère que les projections préfigurent une variation de la saisonnalité des précipitations et une augmentation de leur variabilité interannuelle, les effets attendus sont relatifs à la quantité et à la qualité de la production agricole.

Pour les cultures sèches, la rareté de l'eau à certains stades de développement (floraison, pollinisation, remplissage des fruits) peut entraîner une réduction drastique des niveaux de productivité, en particulier pour les cultures d'été (par exemple le maïs).

Pour les cultures irriguées, par contre, l'augmentation de la transpiration des plantes et de l'évaporation du sol peut aggraver la pénurie d'eau, d'où la nécessité de fournir plus d'eau par l'irrigation ou d'introduire des variétés plus tolérantes au stress hydrique. Dans la ceinture alpine méridionale, les exploitations agricoles sans infrastructure d'irrigation sont également susceptibles d'avoir besoin de systèmes artificiels pour fournir l'eau nécessaire à leurs cultures (Wriedt et al., 2009 ; Vanham, 2012).

L'augmentation de la demande en eau pour l'irrigation, au moins à certaines périodes de l'année, peut entraîner l'intensification de la concurrence avec d'autres secteurs (par exemple l'eau potable et l'utilisation industrielle), tandis que l'abaissement des aquifères, et l'augmentation consécutive de l'énergie requise pour le drainage, rendront la pratique de l'irrigation plus coûteuse et polluante d'un point de vue énergétique (MATTM, 2014).

Certains travaux indiquent qu'à moyen terme, en raison des scénarios d'augmentation modérée de la température, les cultures alpines ne devraient pas être affectées par des problèmes particuliers de rareté de l'eau, cependant, une fois les seuils critiques dépassés, les impacts négatifs seraient particulièrement significatifs puisque, apparaissant également sur les cultures fourragères, ils impliqueraient indirectement aussi l'élevage (Bosello, Marazzi, & Nunes, 2007).

D'autres études dans la vallée suisse du Rhône montrent que ce n'est pas seulement la quantité de précipitations qui influence la disponibilité de l'eau. Des températures plus élevées entraînent la fonte rapide des glaciers et s'il y a une augmentation de la libération annuelle d'eau utilisable au cours des premières décennies du printemps, il y a une grave contraction de la disponibilité de l'eau pour l'irrigation et les impacts sont aggravés par des étés plus chauds et plus secs (Fuhrer & Jasper, 2014).

Une étude réalisée dans plusieurs districts hydrographiques de Suisse (Fuhrer & Jasper, 2012) a confirmé que même dans un pays dont on pense qu'il dispose de ressources en eau importantes, avec des précipitations et des débits élevés, des quantités d'eau supplémentaires importantes peuvent être nécessaires pour l'irrigation. Parmi les zones examinées dans le cadre de l'étude, on trouve des zones intérieures particulièrement sensibles, déjà caractérisées par des précipitations relativement plus faibles. Dans les années extrêmes, les volumes d'eau à utiliser pour maintenir les rendements optimaux des cultures seront plusieurs fois supérieurs à ceux utilisés les années considérées comme « dans la norme » d'un point de vue climatique.

La rareté de l'eau n'affectera pas seulement les communautés végétales, mais aura aussi des répercussions sur la disponibilité de l'eau pour les animaux, pour les bergers et pour toutes les structures impliquées dans la transformation des produits en altitude.

Cependant, il ressort de l'analyse de la littérature que les variations des caractéristiques des précipitations, et l'augmentation de la demande d'eau pour l'irrigation qui en résulte, dépendent beaucoup de la topographie des territoires et qu'il faut donc s'attendre à une grande variabilité. Il est donc observé que les études à grande échelle ne sont pas appropriées pour identifier les zones qui représenteront de véritables « zones sensibles », car elles sont affectées, par exemple, par un approvisionnement en eau de fusion glaciaire et dépendent uniquement de l'approvisionnement en eau de pluie et en eau de fonte de neige. (Fuhrer & Jasper, 2012).

3.2.3 EVÉNEMENTS EXTREMES

Parmi les principales manifestations du changement climatique, on s'attend à une augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur, les fortes pluies et les sécheresses. L'augmentation de la fréquence de ces événements pendant les phases critiques du développement des cultures peut accentuer davantage les impacts du changement climatique. Par exemple, l'augmentation du stress thermique pendant la phase de floraison pourrait avoir un impact particulier sur les cultures printemps-été, avec des réductions de rendement beaucoup plus importantes (d'environ 20 points avec des variations de -14% à -34%) que celles supposées par rapport aux seules variations climatiques moyennes (MATTM, 2014).

L'intensification des phénomènes de précipitations et l'augmentation relative du risque hydrogéologique peuvent en effet mettre en danger certaines cultures situées dans des zones instables et/ou exposées. De plus, l'augmentation des précipitations peut entraîner l'érosion des couches superficielles fertiles (Williams, 2001), qui augmentera à mesure que la pente du sol augmente, épuisant ainsi les éléments nutritifs. Les mêmes événements peuvent également induire des phénomènes périodiques de saturation en eau dans les sols qui peuvent endommager les cultures en réduisant la présence d'oxygène, augmenter leur vulnérabilité aux maladies et rendre les opérations de culture normales difficiles ou impossibles avec des pertes économiques importantes (Bosello Marazzi, & Nunes, 2007). L'intensification du vent, associée à la réduction des précipitations, augmentera également le risque d'érosion éolienne (MATTM, 2014) et de dépôt de cultures sensibles (ex. blé tendre).

Il est également important de souligner que les événements climatiques extrêmes sont susceptibles de causer des dommages irréversibles aux communautés herbagères des prairies. Les conditions édaphiques et climatiques dans les Alpes limitent la capacité de régénération de ces milieux, qui sont donc très fragiles et vulnérables, tout en étant particulièrement précieux pour leurs caractéristiques floristiques et fauniques. La détérioration rapide des pâturages due à des événements climatiques extrêmes fréquents peut aussi avoir des effets indirects, comme l'arrivée et la colonisation d'espèces végétales pionnières non caractéristiques des communautés végétales des pâturages, ou l'accélération de la dynamique du boisement, causée en partie par l'élévation de l'altitude des plans de végétation (Chaix, Dodier, & Nettier, 2017).

En ce qui concerne les effets sur l'élevage, il convient de rappeler qu'en général, les bovins ont une bonne capacité d'adaptation de leurs fonctions de base pour faire face aux changements thermiques, mais qu'en raison d'un stress excessif ou sévère, ces capacités sont amoindries.

Tout d'abord, les vagues de chaleur entraînent une augmentation de la demande d'énergie, pour laquelle une partie des ressources énergétiques n'est plus disponible pour des fonctions de production telles que la croissance, puisqu'elles s'engagent à mettre en place des mécanismes de blocage/dissipation de la chaleur.

Le stress chaud est également capable de déclencher une longue série de problèmes physiologiques et métaboliques, qui conduisent à une susceptibilité accrue aux maladies respiratoires, au système locomoteur, aux dysmétabolismes digestifs ainsi qu'à une altération des fonctions immunitaires et de l'état antioxydant de l'organisme.

De plus, il a été démontré que le risque de troubles métaboliques augmente en raison de l'absorption accrue des endotoxines. Dans ce cas, le foie n'est pas en mesure de détoxifier la grande quantité de ces substances en circulation, ce qui entraîne un risque accru de troubles métaboliques.

Parmi les principaux signes de stress thermique, il y a une réduction de la consommation alimentaire, associée à une augmentation de la consommation d'eau, une réduction des mouvements et une augmentation du temps de repos. L'une des conséquences directes de ces facteurs est une grave dégradation des performances de croissance et donc de l'efficacité de la production.

Pour la production de viande, tous les phénomènes décrits se traduisent par une diminution de la qualité organoleptique du produit, qui se traduit par sa couleur et sa consistance, tandis que la valeur plus élevée du pH compromet également sa durée de conservation, la rétention d'eau lors de la cuisson, son goût et son arôme.

Chez la vache allaitante, les vagues de chaleur ont un impact négatif sur la performance de production, ce qui est plus évident et plus facile à percevoir en termes de reproduction. Lors des vagues de chaleur, en effet, la fertilité est compromise car du point de vue métabolique, c'est la satisfaction des fonctions essentielles à la survie qui est privilégiée. En outre, la réduction de l'apport alimentaire et la plus grande distribution des nutriments et de l'énergie pour maintenir l'eutermie, se traduisent par une probabilité plus faible de conception et / ou de maintien de la grossesse, ainsi que le fait que pendant les vagues de chaleur se produit une accumulation de substances pro-oxydants au niveau embryonnaire qui en inhibent et limitent le développement (Rossi et Compiani, 2017).

Les températures élevées éventuellement associées à un taux d'humidité élevé déterminent toutes les répercussions mentionnées ci-dessus également sur les vaches laitières, ce qui se traduit par une diminution drastique de la performance de production (West, 2003).

3.2.4 AUGMENTATION DU CO₂ ATMOSPHÉRIQUE

L'augmentation du dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, si c'était le seul facteur en jeu, pourrait avoir un impact positif sur les cultures agricoles. En effet, une augmentation du CO₂ peut entraîner une augmentation du taux de photosynthèse ("*CO₂ fertilisation*"). Il a également été observé que les espèces du cycle C3 (la plupart des espèces cultivées) réagissent plus fortement à ces variations que les espèces du cycle C4 (par exemple le maïs, le sorgho), qui sont plus photosynthétiquement efficaces que les premières.

Cependant, l'augmentation de la concentration de CO₂ aura également des répercussions positives sur l'activité photosynthétique des mauvaises herbes, augmentant leur capacité concurrentielle, avec diverses conséquences sur les actions de contrôle. En ce qui concerne les répercussions sur l'utilisation de l'eau, pour des concentrations élevées de CO₂, on prévoit une réduction de la transpiration par unité de surface foliaire, donc une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'eau. Cependant, les effets combinés de la baisse du taux de transpiration avec ceux de l'augmentation de la surface foliaire induite par le CO₂, les mécanismes complexes de rétroaction existant à l'échelle territoriale entre les flux de surface et l'atmosphère et la combinaison de ces dynamiques avec les variations de température et de précipitations restent à comprendre (CLIMAGRI, 2003 ; MATTM, 2014).

3.2.5 L'AUGMENTATION DES PHYTOPATHOLOGIES

On estime actuellement que les maladies et les insectes ravageurs génèrent environ 50% des pertes des huit cultures alimentaires et économiques les plus importantes du monde et il est prouvé que le changement climatique peut influencer de manière significative les effets des maladies et des attaques d'insectes sur la productivité agricole.

Ce phénomène peut se produire, par exemple, en modifiant la propagation de certaines espèces ou en introduisant de nouveaux pathogènes et vecteurs et l'émergence d'une dynamique épidémiologique inconnue.

Bregaglio, Donatelli & Confalonieri (2013) ont développé un modèle européen de prévision pour les années 2030 et 2050, dont les résultats montrent une augmentation générale des événements infectieux par champignons pathogènes en raison des changements de température, des précipitations et de la disponibilité des nutriments, à travers des modèles géographiques complexes. En particulier, il est à noter que les impacts négatifs affecteront les vignobles et les cultures de blé.

Les changements climatiques et environnementaux dus aux changements climatiques peuvent également influencer les interactions cultures-parasites.

Mitchell, Reich, Tilman & Groth (2003), par exemple, ont souligné les impacts accrus des champignons pathogènes en raison de l'extension de la période de végétation, mais il est possible que les changements climatiques affectent également la physiologie et le degré de résistance des plantes hôtes, ainsi que les modèles de croissance et les taux de développement des cycles biologiques des pathogènes.

En fait, divers facteurs environnementaux peuvent agir au niveau de la biologie des pathogènes, ce qui, dans des conditions proches de l'optimum, peut donner lieu à des épidémies de plus en plus graves ou s'étendre dans des zones géographiques où l'on peut trouver de nouvelles espèces hôtes.

Des hivers plus doux réduiront la mortalité des ravageurs, tandis que la hausse générale des températures entraînera une augmentation du nombre de générations par cycle de culture, ce qui accélèrera les taux de croissance des ravageurs (Reddy, 2013).

L'augmentation thermique peut également influencer la reproduction sexuée des pathogènes, allongeant la période appropriée pour ce type de reproduction et augmentant le potentiel évolutif des populations (*Envirochange*). La rapidité de ces dynamiques peut amener les pathogènes à surmonter rapidement la résistance développée par l'espèce hôte (Petzoldt & Seaman, 2010).

L'effet du changement climatique entraînera également un développement plus rapide de la résistance aux produits agropharmaceutiques de la part des pathogènes et des insectes ravageurs.

Enfin, les mêmes variations peuvent avoir des répercussions sur la sensibilité de l'hôte aux infections et/ou augmenter la manifestation des symptômes, exacerbant ainsi le développement de la maladie.

Pour contrer les problèmes futurs liés à toutes ces dynamiques complexes, les agriculteurs seront amenés à utiliser plus d'ingrédients actifs ou des doses plus élevées, augmentant ainsi le coût de production pour les agriculteurs, la pollution des sols et de l'eau, le prix pour les consommateurs et la probabilité que les plantes ainsi protégées développent au fil du temps des mécanismes de résistance aux pesticides (*Envirochange*).

1.1.1. AUTRES IMPACTS

En plus des aspects mentionnés ci-dessus, il existe un certain nombre d'autres impacts possibles, qui sont moins directs ou de nature encore plus complexe. Il s'agit, par exemple, de l'évolution du comportement alimentaire des animaux, de l'impact de la dynamique des populations sur les animaux sauvages en interaction avec l'agriculture et l'élevage et de l'aggravation des conditions de travail des bergers (Chaix, Dodier, & Nettièr, 2017).

4 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ

4.1 INTRODUCTION

La biodiversité se définit comme la variété et la variabilité des organismes vivants et des systèmes écologiques dans lesquels ils vivent et inclut la diversité au niveau génétique (différences dans le patrimoine génétique d'une espèce), au niveau spécifique (nombre d'espèces et leur abondance relative dans une zone ou un écosystème donné) et au niveau de l'écosystème (variété des écosystèmes présents sur un territoire donné et interrelations avec les espèces qui les habitent) (*Convention on Biological Diversity - CBD, 1982*).

La région alpine, grâce à la variété des conditions écologiques provenant des différents gradients d'altitude, de la température et des précipitations qui la caractérisent, est l'une des régions les plus riches d'Europe en termes de ressources environnementales et de biodiversité (Angelini & Weldeyesus, 2017).

Ceci est confirmé par le fait que les Alpes abritent 870 sites d'importance communautaire et 19 aires protégées en Suisse, qui abritent des espèces végétales, des espèces animales et des habitats d'un grand intérêt naturel.

Cependant, le tableau des « niveaux de menace » des urgences environnementales est plutôt préoccupant en raison d'un certain nombre de facteurs de pression. Il s'agit notamment du changement climatique, qui affecte la biodiversité par des interactions complexes dont l'ampleur est difficile à évaluer, mais qui semblent capables de modifier à la fois la structure des habitats et leurs fonctions écologiques (Ministère de l'Environnement, de la Terre et de la Mer, 2011).

4.2 LES PRINCIPAUX EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA BIODIVERSITÉ

Bien qu'il n'existe pas de projections consolidées et généralisées du changement climatique pour la région alpine, les macro-phénomènes généralement reconnus sont une augmentation de la température moyenne annuelle et une modification du régime des précipitations. Certains des effets qui en résultent peuvent interagir de manière significative avec les conditions écologiques des régions montagneuses et alpines, comme le montre la figure 4.1.

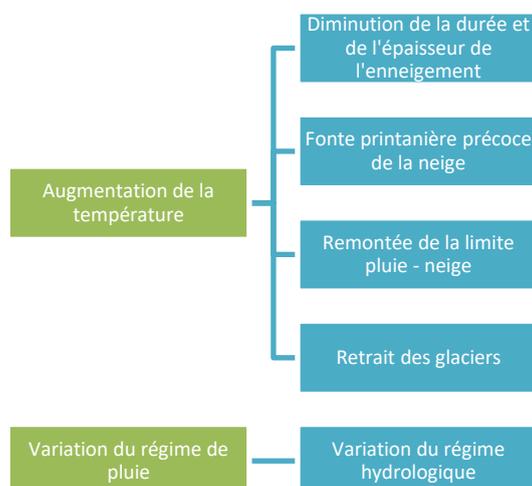


Figure 4.1. Impact du changement climatique sur la biodiversité.

Mais en plus de ces effets immédiatement perceptibles, tous les paramètres directement ou indirectement impliqués dans le changement climatique peuvent avoir des implications pour la biodiversité : température de l'eau, rayonnement solaire, rayonnement ultraviolet, humidité, couverture nuageuse, fréquence et intensité des événements extrêmes.

L'apparition de périodes importantes de réchauffement ou de refroidissement de la planète a toujours impliqué le développement de stratégies d'adaptation par espèce, mais l'intensité et la vitesse actuelle des changements semblent rendre inefficaces les processus évolutifs normaux pour beaucoup d'entre elles.

Les principaux impacts sur les organismes et les communautés biotiques peuvent être résumés comme suit :

- des changements dans les fonctions physiologiques et l'activité métabolique, jusqu'à ce que les effets possibles sur la dynamique de la population soient établis ;
- des changements dans la durée des phases de croissance, changement de phase des cycles de vie du prédateur et de la proie, du parasite et de l'hôte, avec propagation des effets dans tout le réseau alimentaire (Parmesan, 2006) ;
- des changements phénologiques, c'est-à-dire la manifestation saisonnière de certains phénomènes biologiques : variations dans les périodes de floraison des espèces de plantes alpines, anticipation ou retard de migration, avec le risque d'une désynchronisation très rapide des événements reproducteurs entre les différents niveaux trophiques ;
- des mouvements d'altitude et de latitude des espèces, qui montent vers les sommets ou vers le nord pour suivre les conditions écologiques et climatiques appropriées à leur survie et pour atteindre des habitats alternatifs appropriés. Extinctions locales ou finales d'espèces incapables d'atteindre les habitats appropriés dans le temps ou de se déplacer plus loin lorsque des altitudes plus élevées sont atteintes. Ces processus sont aggravés par la faible capacité de dispersion de nombreuses espèces alpines, associée à des situations fréquentes de fragmentation de l'habitat, avec pour conséquence des événements possibles de « goulot d'étranglement » (ou réduction de la variabilité génétique due à une réduction drastique de la population) qui compromettent la capacité d'adaptation des organismes. Changements dans la population et la communauté, dus aux mouvements d'individus et d'espèces à l'intérieur et à l'extérieur du pays, avec des changements dans la distribution, la composition et l'abondance relative. Ces changements impliquent des changements dans la structure et les fonctions écologiques des habitats, ainsi que des effets sur les autres espèces présentes ;
- l'interférence avec les phénomènes de concurrence interspécifique, car les espèces tolérantes sont favorisées au détriment des espèces sténothermiques ;
- de nouvelles invasions biologiques ou la propagation d'espèces exotiques envahissantes déjà présentes.

4.3 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES

La littérature scientifique sur les impacts du changement climatique sur la biodiversité rencontre des difficultés pour : a) différencier adéquatement la dynamique du réchauffement climatique (par exemple d'autres perturbations anthropiques) ; b) généraliser les informations et les données issues d'études détaillées ; 3) formuler des projections à grande échelle et à long terme (Walther et al., 2002).

Cependant, il semble suffisamment clair que les écosystèmes aquatiques sont parmi les plus directement menacés.

4.3.1 ECOSYSTÈMES AQUATIQUES

Les changements les plus importants dans la structure et les fonctions de ces écosystèmes proviennent principalement des altérations des caractéristiques hydrologiques qui peuvent se produire sans même que les valeurs moyennes ne changent (Bates, Kundzewicz, Wu, & Palutikof, 2008).

Par rapport à l'augmentation de la température de l'atmosphère, on note de nettes augmentations de la température de l'eau dans plusieurs rivières européennes (Solheim, Austnes, Eriksen, Seifert, & Holen, 2010), et des effets particulièrement marqués sont attendus pour les rivières alpines, en raison de la réduction de la couverture neigeuse et des glaciers. Ceci a des conséquences immédiates sur le régime des débits saisonniers (Barnett, Adam, & Lettenmaier, 2005 ; Eckhardt & Ulbrich, 2003 ; Jasper, Calanca, Gyalistras, & Fuhrer, 2004 ; Zierl & Bugmann, 2005).

En ce qui concerne les composantes biotiques, une étude couvrant les milieux d'eau douce dans toute l'Europe (Markovic et al., 2014) prévoit, en raison du changement climatique, qu'on observera d'ici 2050 une diminution de la qualité des habitats pour la plupart des espèces analysées (plantes, poissons, mollusques, amphibiens, reptiles, odonates, crustacés), combinée à un déplacement des distributions vers le nord-est. Selon ces prévisions, 6 % des espèces communes et 77 % des espèces rares perdraient plus de 90 % de leur aire de répartition actuelle. Huit espèces de poissons et neuf mollusques perdraient la totalité de la zone en raison du changement climatique, tandis que 50 % des espèces de poissons et mollusques considérées dans les nouvelles aires de répartition ne pourront plus bénéficier du soutien que leur apportent les aires protégées.

Dans le contexte européen, les taxons les plus vulnérables sont ceux adaptés au froid ainsi que les espèces endémiques adaptées aux températures plus chaudes de la zone méditerranéenne (Domisch et al., 2013). Les modèles appliqués impliquent une réorganisation des communautés en ce qui concerne leur composition structurelle et fonctionnelle dans le continuum fluvial à petite échelle.

Dans les lacs, la hausse des températures a des effets très articulés sur la thermique du lac (Ambrosetti & Barbanti, 2002 ; Solheim et al. 2010 ; Tartari, Marchetto, & Copetti, 2000 ; Tartari, Copetti, & Marchetto, 2002) qui dépend des caractéristiques morphométriques et hydrologiques. En plus des effets directs, il faut aussi tenir compte d'un certain nombre de conséquences indirectes ; par exemple, l'influence des variations de température sur l'extension de la saison de production a été mise en évidence, avec des implications sur les efflorescences algales qui auraient tendance à se produire plus tôt au printemps et à se terminer plus tard en automne (Thackeray, Jones, & Maberly, 2008). Plusieurs études établissent un lien entre le rythme du changement climatique et l'augmentation des espèces potentiellement toxiques dans les lacs, en particulier les cyanobactéries (Paerl & Huisman, 2009 ; Posch, Köster, Salcher, & Pernthaler, 2012).

Parmi les écosystèmes les plus étudiés, en raison de leur plus grande vulnérabilité, on trouve les eaux lenticques petites et peu profondes, y compris les lacs de haute altitude (Castellari S. et al., édité par, 2014).

En particulier, les bassins lacustres situés au-delà de la limite forestière abritent un grand nombre d'espèces, souvent endémiques ou des épaves glaciaires, qui sont particulièrement sensibles même aux petites variations de température et à la durée de la couverture de glace. Le réchauffement de la planète peut entraîner des changements dans la composition des espèces des communautés, la perte d'espèces moins tolérantes et la colonisation par des espèces normalement adaptées pour vivre à des altitudes plus basses. De plus, une réduction de la période de couverture de glace peut entraîner une augmentation de la production primaire.

Dans les milieux lenticques temporaires, il peut y avoir des variations significatives dans la durée de la phase de présence d'une lame d'eau, avec des répercussions sur la phénologie et sur la persistance des espèces présentes exclusivement dans ce type de milieu et avec des aires de répartition particulièrement restreintes (Mura & Rossetti, 2002).

Durant les années particulièrement sèches, les bassins peu profonds peuvent connaître un assèchement complet, entraînant la perte d'espèces qui ne peuvent survivre que dans les lacs permanents (Cantonati & Lazzara, 2006 ; Ludovisi, Gaino, Bellezza, & Casadei, 2013).

En ce qui concerne les communautés d'organismes macrobenthiques dans les étangs et les lacs, de nombreuses études montrent qu'il existe déjà des répercussions importantes en ce qui concerne les distributions et dominances spécifiques (Luoto & Nevalainen, 2012 ; Luoto & Nevalainen, 2013 ; Oertli, Indermuehle, Angélibert, Hinden, & Stoll, 2008).

Particulièrement important, mais tout aussi difficile, l'estimation des effets en cascade sur l'ensemble des paramètres qui déterminent la qualité écologique (physico-chimique et biologique) des masses d'eau, dont l'état est normalisé par la réglementation en vigueur (Directive 2000/60/UE ou Directive-cadre sur l'eau - DCE21, Commission européenne, 2000 ; Décret législatif 152/2006) et dont le non-respect peut donner lieu à des procédures d'infraction. Il semble que les variations climatiques puissent modifier les "conditions de référence" qui, conformément à la Directive-Cadre sur l'Eau, doivent être établies pour toutes les masses d'eau (Kernan, Battarbee, & Moss, 2010).

4.3.2 COMMUNITÉ ET ESPÈCES ANIMALES

Les animaux ectothermes, tels que les amphibiens, les reptiles, les poissons, sont particulièrement sensibles aux variations de température.

La température ambiante influence tous les aspects vitaux de l'herpétofaune, comme les périodes d'activité, le taux métabolique, la fonction du système immunitaire, la susceptibilité aux maladies, la croissance et le développement, la reproduction, la distribution géographique et le choix de l'habitat (Bickford, Howard, Ng, & Sheridan, 2010).

Des hivers trop chauds pourraient épuiser les ressources énergétiques des espèces en hibernation, tandis que certains individus pourraient être tués par des gelées tardives. Les reptiles et les amphibiens ont une capacité de dispersion trop limitée pour réagir aux changements rapides, tandis que l'adaptation *in situ* exige de très grandes populations pour être efficace (AA.VVV, 2008). Cet aspect est très critique pour des groupes tels que les amphibiens qui présentent déjà des tendances démographiques négatives, en raison de divers facteurs agissant en synergie : perte et dégradation des habitats, maladies infectieuses favorisées par le changement climatique (*climate-linked epidemic hypothesis*), rayonnement UV (D'Amen et al., 2011). Les mécanismes potentiels qui sous-tendent les extinctions locales sont devenus plus clairs grâce aux corrélations identifiées entre l'augmentation de la température moyenne, le déclin physique et la diminution de la fécondité (Reading, 2007). D'Amen et Bombi (2009) ont analysé plusieurs facteurs comme causes potentielles de déclin. Pour le changement climatique, ils ont pris en compte deux facteurs principaux : la réduction de la disponibilité de l'eau et l'augmentation thermique, mettant en évidence une corrélation entre les régimes climatiques enregistrés et les pertes réelles d'amphibiens mesurés.

Les taux métaboliques et de nombreuses fonctions physiologiques des poissons d'eau douce sont affectés par la température. En particulier, la température est l'un des principaux facteurs environnementaux affectant la reproduction des Salmonidés, des Chypristes et des Percidés. La réponse des poissons au réchauffement climatique peut prendre la forme d'un déplacement vers des zones où la température et les conditions environnementales sont optimales, à la fois dans la masse d'eau elle-même et à une plus grande échelle spatiale (Mehner, Emmrich, & Kasprzak, 2011), ou des réponses physiologiques et écologiques, telles que les taux de croissance et les modes de reproduction (Lappalainen, & Tarkan, 2007).

Une étude menée sur un cours d'eau alpin en Autriche (Matulla, Schmutz, Melcher, Gerersdorfer, & Haas, 2007), a corrélé la composition d'une communauté observée avec les conditions climatiques supposées par le scénario IS92a du GIEC, pour lesquelles on a estimé une élévation des communautés de pêcheurs d'environ 70 mètres vers la source des cours d'eau. Il en résulterait un stress accru pour les espèces qui

ont besoin d'eau plus froide, forçant les Cyprinidés à avancer et les Salmonidés à battre en retraite. Des espèces comme la Truite (*Salmo trutta*), déjà sous pression concurrentielle, subiraient une perte d'habitat supplémentaire en faveur d'espèces envahissantes comme la Truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*), mieux adaptée à des températures plus élevées. Ces changements toucheraient également la pêche récréative au saumon, qui est une activité importante sur le plan économique. Le déplacement de l'aire de répartition et le déclin des populations de *Salmo trutta* ont également été observés dans le réseau fluvial suisse (Hari, Livingstone, Siber, Burkhardt-Holm, & Guettinger, 2006). Cependant, des barrières physiques limitent la migration longitudinale, ce qui entraîne une réduction des habitats. À des altitudes plus basses, l'incidence de la maladie rénale proliférative, qui dépend de la température, était plus élevée. Dorts et al (2011) ont plutôt mené une étude expérimentale sur le Chabot (*Cottus gobio*), de sorte qu'une augmentation de la température de l'eau, en ligne avec les prévisions du changement climatique, pourrait affecter la performance reproductive de l'espèce et avoir des effets délétères sur la dynamique des populations. En général, avec le réchauffement, il faut s'attendre à une augmentation de la richesse en espèces, en particulier des heuriterms, et à une diminution de la biomasse, de la densité et de la taille moyenne du corps.

Le changement climatique est également considéré comme un facteur d'influence sur la composition des communautés d'oiseaux, ce qui modifie l'abondance relative des espèces. Encore une fois, ces facteurs s'additionnent et interagissent avec d'autres processus anthropiques, en premier lieu les changements dans l'utilisation des terres. La contraction des aires de répartition des populations dans les zones les plus septentrionales a été soulignée, contre l'expansion vers le nord d'espèces à répartition plus méridionale, dans une sorte d'échange qui ne semble pas augmenter la richesse locale spécifique et qui peut au contraire avoir des effets sur la diversité fonctionnelle des communautés ornithiques (Virkkala & Lehikoinen, 2017). D'une manière générale, les données montrent que les oiseaux essaient de s'adapter aux changements en cours, bien que les facteurs impliqués soient nombreux, de même que les réponses des espèces individuelles et même des populations individuelles. Diverses études ont montré, par exemple, que les oiseaux migrateurs changent de périodes et de routes migratoires (Mingozzi et al., 2013 ; Rubolini et al., 2007).

Les espèces alpines typiques sont particulièrement adaptées à l'enregistrement des effets des variations climatiques. Par exemple, les oiseaux vivant dans des environnements montagneux ouverts, au-delà des limites des arbres, peuvent être affectés par les ascensions en forêt. En effet, il s'agit souvent d'espèces sédentaires, très sélectives dans le choix de l'habitat, dont la présence est limitée à des niches climatiques réduites. C'est le cas du Lagopède alpin (*Lagopus muta helvetica*), une espèce phare pour laquelle la perte d'habitats appropriés dans les Alpes italiennes est estimée à environ 28% d'ici 2039 (Ferrarini, Alatalo, & Gustin, 2017). Une étude menée dans le Parc naturel de l'Alpe Veglia et du Devero a également montré un déclin plus ou moins prononcé de la population de lagopède alpin en raison du retard des chutes de neige. D'autre part, la disparition précoce de la neige du sol pourrait favoriser l'espèce, entraînant un succès de reproduction plus élevé, mais des températures estivales plus élevées pourraient causer l'hyperthermie chez les individus (Imperio, Bionda, Viterbi, & Provenzale, 2013).

Une réduction significative de la répartition régionale du potentiel a été prévue pour la Chouette boréale (*Aegolius funereus*) et la Chevêchette d'Europe (*Glaucidium passerinum*), qui sont des oiseaux spécialisés des forêts de montagne, en raison de l'augmentation des températures dans les Alpes lombardes (Brambilla, Bergero, Bassi, & Falco, 2015).

Bisi, Wauters, Preatoni, & Martinoli, (2015) ont évalué les distributions potentielles du Lièvre variable (*Lepus timidus*) et du Lièvre brun (*Lepus europaeus*) sur la base de différents scénarios climatiques développés par le GIEC. Pour le Lièvre variable, on suppose un remodelage de l'aire de distribution, surtout en raison de l'augmentation des températures, avec les extinctions locales qui en découlent, en particulier à la limite sud de l'aire.

La réponse des espèces sociales au changement climatique peut dépendre, en partie, de leur influence sur la structure sociale du groupe, agissant sur les paramètres de reproduction et donc sur le recrutement de la population. Une étude qui a duré 23 ans dans la réserve naturelle de La Grande Sassièr (Alpes françaises) sur la Marmotte (*Marbleta marmota*), a montré comment les effets du changement climatique réduisent principalement la survie des jeunes, avec des conséquences sur le nombre de nouveaux " aidants " recrutés dans la population au fil des ans (Rézouki et al., 2016). Une deuxième étude de la même population a montré une corrélation entre le changement climatique et une diminution de la taille des portées, principalement due aux changements d'épaisseur de la couverture neigeuse en hiver (Tafari, Cohan, Bonenfant, Gaillard, & Allainé, 2013).

Le changement climatique peut également affecter les grands herbivores tels que les Bouquetins (*Capra ibex*), qui ne tolèrent pas bien la chaleur. Aublet, Festa-Bianchet, Bergero, & Bassano (2009), dans le Parc National du Grand Paradis, ont montré une diminution du temps consacré à la recherche de nourriture par les mâles adultes à mesure que la température et l'irradiation augmentaient. Toujours au Grand Paradis, des études sur les femelles de Bouquetins ont identifié des variations dans le comportement spatial saisonnier par rapport aux facteurs climatiques (couverture de neige en hiver et températures en été). En particulier, les températures estivales plus élevées ont forcé les femelles à s'élever plus haut pendant la journée et à redescendre plus bas le soir, ce qui a entraîné des coûts énergétiques plus élevés (Grignolio, Rossi, Bassano, Parrini, & Apollonio, 2004).

Parmi les invertébrés, les effets positifs du changement climatique ont été démontrés par rapport au Processionnaire du pin (*Thaumetopoea pityocampa*), un défoliateur lépidoptère, qui jouit d'une plus grande survie des larves en raison de l'augmentation des températures hivernales minimales. Une expansion latitudinale et altitudinale de l'espèce a déjà été observée en France et en Italie et l'augmentation thermique est également liée à une activité de vol plus élevée qui permet une colonisation plus rapide de nouveaux sites et espèces hôtes (Battisti et al., 2005 ; Battisti, Stastny, Buffo, & Larsson, 2006 ; Buffo, Battisti, Stastny, & Larsson, 2007).

4.3.3 VÉGÉTATION

Pour ce qui concerne la végétation, le phénomène physiologique et structurel le plus important lié au changement climatique est la migration des formations forestières vers des altitudes plus élevées. Cependant, il est souvent difficile de faire la distinction entre le rôle du réchauffement climatique et celui de l'abandon des pratiques pastorales.

Une étude réalisée dans les Alpes suisses (Gehrig-Fasel, Guisan, & Zimmermann, 2007), a identifié une augmentation significative du couvert forestier entre 1650 et 2450 mètres au-dessus du niveau de la mer, dont seulement 4% du changement d'altitude se situe au-dessus de la limite potentielle d'implantation locale des arbres, ce qui permet d'identifier le changement climatique comme la cause de ce changement.

Une étude de 7 ans (Erschbamer, Unterluggauer, Winkler, & Mallau, 2011) a été réalisée sur quatre pics dolomitiques différents le long d'un gradient d'altitude afin de définir les changements dans les schémas de diversité, les tendances migratoires et les menaces potentielles pour les espèces endémiques dans l'environnement écotonal. Les résultats révèlent une augmentation de la richesse spécifique sur les quatre sommets, les valeurs les plus élevées se trouvant sur les deux sommets les plus élevés (15 et 18 %). Même en l'absence de tendances claires pour les deux pics les plus bas, il y a eu un roulement élevé d'espèces et le nombre d'espèces arrivant était plus élevé que le nombre d'espèces perdues. L'augmentation de la présence d'espèces sur les sommets étudiés peut être liée à l'augmentation continue de la durée de la période végétative. Sur le sommet le plus bas, la croissance luxuriante de la végétation et l'établissement de jeunes individus dénote une migration à l'altitude de la limite de la forêt. Les espèces disparues appartiennent à différentes aires altitudinales, tandis que depuis le plus haut sommet, la disparition d'une espèce endémique a été mise en évidence (*Potentilla nitida*).

Une étude menée dans les Alpes bernoises (Providoli & Kuhn, 2012) visait à identifier quels changements dans l'étendue du couvert forestier peuvent être directement attribués au changement climatique. Les résultats montrent qu'environ 20 % des variations constatées sont directement attribuables aux changements climatiques, tandis que le pourcentage restant est attribuable aux activités humaines qui modifient l'utilisation des terres.

Carlson et al (2014) supposent, à travers le développement de trois scénarios dans la vallée de Chamonix (Alpes françaises), la perte d'aires de répartition des espèces végétales alpines, combinée et atténuée par la disponibilité de nouvelles zones libérées par le recul des glaciers avec pour conséquence l'établissement de nouvelles successions primaires. Une fois de plus, l'abandon des pratiques pastorales, en synergie avec le changement climatique, est considéré comme un facteur très important pour expliquer l'augmentation du couvert forestier observée.

Mietkiewicz, Kulakowski, Rogan, & Bebi (2017) montrent également une augmentation du couvert forestier dans les Alpes suisses, ce qui réduit la fragmentation et augmente l'homogénéisation du paysage. La composition floristique différente et la plus grande continuité de la couverture végétale, qui découle encore du changement climatique et des différentes utilisations des terres, sont décrites comme des menaces potentielles pour certains services écosystémiques, tels que la biodiversité et la valeur touristique des zones concernées.

5 IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS

5.1 LES PRINCIPAUX MOTEURS DE L'IMPACT DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LES FORÊTS

Le changement climatique a un impact significatif sur les écosystèmes forestiers et les différents facteurs d'impact ont des effets différents sur les différentes formations.

Chaque facteur doit être considéré à la fois individuellement et dans le contexte global du changement climatique. La connaissance spécifique de chaque facteur d'impact est une étape fondamentale pour définir les indicateurs nécessaires à l'évaluation de l'ampleur des impacts.

Les principaux facteurs d'impact pris en considération, avec une influence directe et indirecte sur les formations forestières, sont les suivants :

- l'augmentation du CO₂ atmosphérique ;
- l'augmentation de la température ;
- des changements dans les régimes de précipitations ;
- les perturbations abiotiques (perturbation, sécheresse, incendie, tempêtes de vent) ;
- les perturbations biotiques (insectes et autres phytopathogènes).

De nombreuses études mettent également en évidence les différentes sensibilités des espèces forestières au changement climatique.

Le hêtre, le sapin argenté et l'épicéa sont parmi les essences les plus étudiées en termes de répartition et d'importance économique dans la sylviculture et le marché du bois.

5.1.1 HAUSSE DU CO₂ ATMOSPHERIQUE

La quantité de CO₂ dans l'atmosphère devient de plus en plus importante en tant que facteur d'impact sur les écosystèmes en raison de ses concentrations réelles. En 1960, 9.413 MtCO₂ ont été émises dans le monde entier, en 2016, 36.183 MtCO₂ (figure 5.1). La tendance est à la poursuite de la croissance (figure 5.2 ; Atlas mondial du carbone, 2017), à tel point que la concentration atmosphérique de CO₂ a augmenté à un rythme record en 2016, à la fois en raison des activités humaines et du puissant phénomène "El Niño" (OMM - Organisation Météorologique Mondiale, 2017).

La teneur en CO₂ a maintenant dépassé le seuil de 400 ppm.

L'augmentation de la concentration de CO₂ a des répercussions diverses sur la cenose forestière et toutes ne sont pas nécessairement négatives. Par exemple, cela intensifie le processus de photosynthèse ; mais l'augmentation de la photosynthèse augmente l'intensité de tous les processus physiologiques de la plante, qui nécessite plus d'eau et tire plus d'éléments nutritifs du sol. En particulier, la demande d'azote (N) augmente. La persistance de conditions atmosphériques enrichies en CO₂ pourrait donc avoir des conséquences non négligeables par rapport aux quantités d'azote et d'eau disponibles dans le sol.

Ainsi, contrairement à ce que l'on pourrait attendre, la croissance des plantes n'est pas proportionnelle à l'augmentation du CO₂.

Il a également été constaté que l'augmentation du CO₂ entraîne une fermeture partielle des stomates. Par conséquent, la perte d'eau par transpiration est réduite, ce qui rend plus difficile pour la plante de contrôler la température des feuilles. Globalement, la plante individuelle est donc confrontée à une situation de déséquilibre physiologique.

L'augmentation du CO₂ est donc un facteur de risque qui contribue à réduire la résilience globale du couvert forestier ; ce n'est pas un facteur déterminant de criticité, mais il pourrait jouer ce rôle là où les peuplements sont déjà stressés par d'autres facteurs d'impact.

Par exemple, la sécheresse et la hausse des températures, combinées à des concentrations élevées de CO₂, pourraient avoir des effets déstabilisateurs importants sur les communautés forestières.

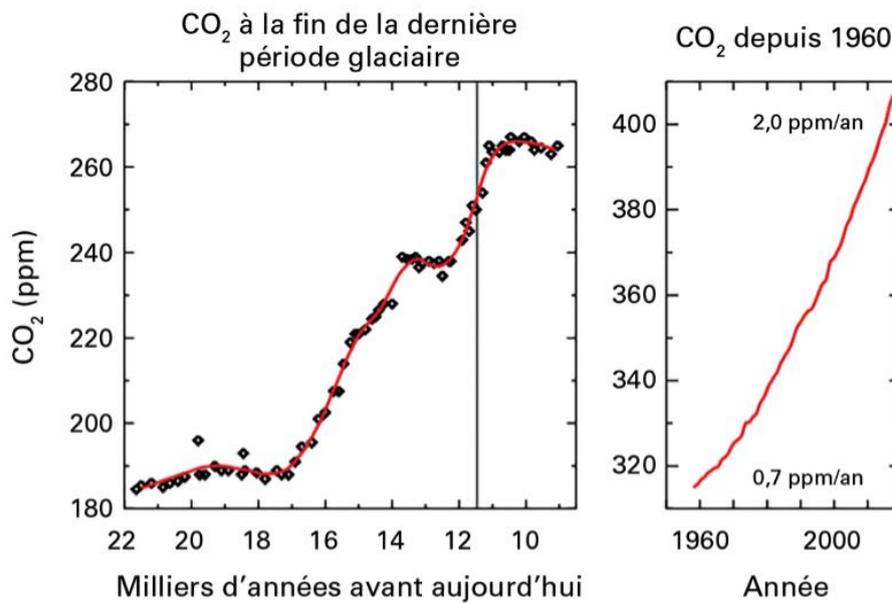
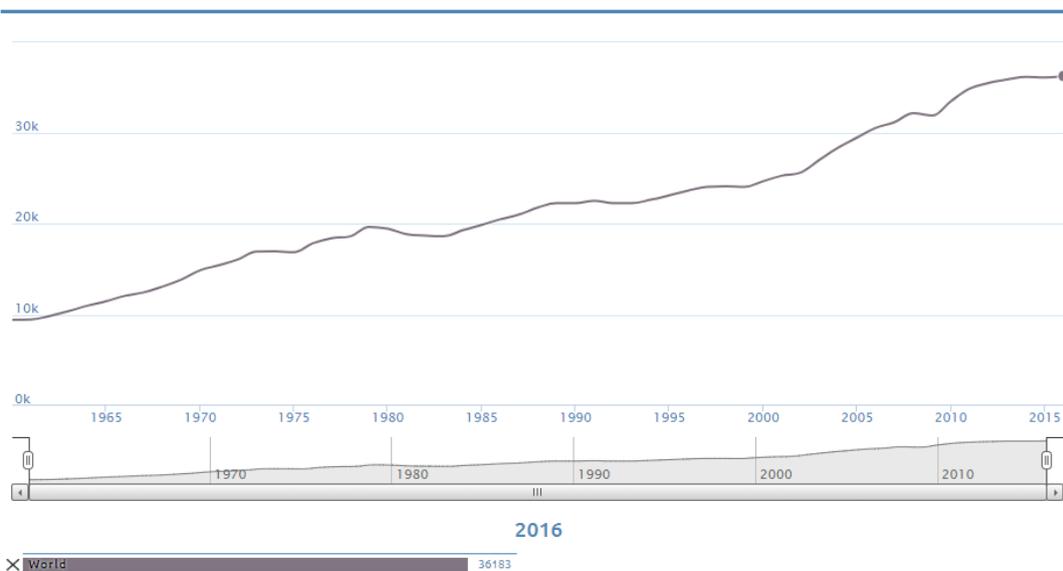


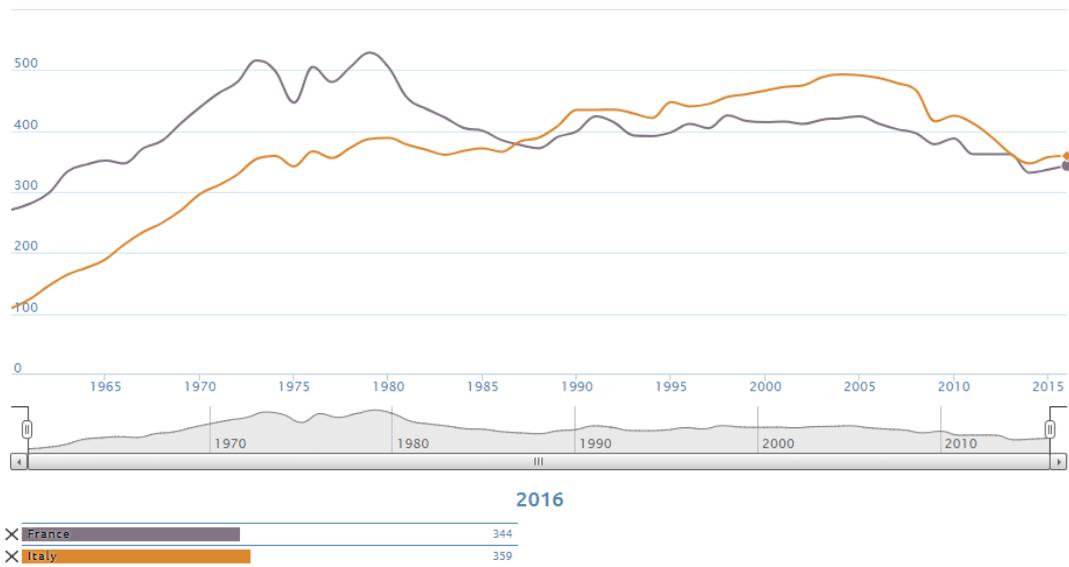
Figure 5.1. Évolution des concentrations de CO₂. Source : OMM. Bulletin sur les gaz à effet de serre, 2017

Territorial (MtCO₂)



a

Territorial (MtCO₂)



b

Figure 5.2. Émissions de MtCO₂ de 1960 à 2016 dans le monde entier (a) et de l'Italie et de la France (b).
Source : Atlas mondial du carbone -2017

5.1.2 AUGMENTATION DE LA TEMPERATURE

Comme pour le CO₂, l'augmentation de la température peut aussi avoir des impacts différents sur les plantes et les écosystèmes forestiers en fonction des interactions avec d'autres facteurs d'impact.

L'augmentation de la température, en référence aux effets directs sur les plantes, peut également avoir des effets positifs. Elle augmente la durée de la saison de croissance mais, dans ces conditions, le facteur limitatif devient la disponibilité de l'eau.

Dans les zones au climat méditerranéen ou dans les zones de montagne à basse altitude, l'augmentation de la température, si elle n'est pas associée à la disponibilité de l'eau, n'entraîne pas de changements dans la croissance.

Dans les zones alpines, en revanche, où l'eau est généralement abondante, l'augmentation de la croissance des individus est visible (A.VVV, 2008) ainsi que l'augmentation de la masse des forêts.

La variation de la durée de la saison de croissance permet également aux espèces normalement situées à des altitudes plus basses et limitées par le climat rude, de pouvoir s'élever en altitude en entrant en compétition avec les espèces qui y sont présentes.

Des plantes plus spécialisées ou plus résistantes aux climats rigoureux sont donc menacées par la compétitivité accrue d'autres espèces.

En ce qui concerne la limite supérieure du quota actuel d'implantation de végétation arborée, la discussion est plus complexe car, si, d'une part, il est clair que la forêt envahit de grandes prairies, il est difficile de distinguer l'évolution du couvert forestier due au changement climatique de celle provenant des changements de nature socio-économique du territoire de montagne. Dans la plupart des cas, on peut dire que ce processus de colonisation est principalement dû à l'abandon du pâturage plutôt qu'à des phénomènes liés au changement climatique.

5.1.3 VARIATIONS DES PLUIES

Les changements dans les précipitations ont un effet direct sur la croissance des plantes.

La disponibilité de l'eau dans le sol, ainsi que d'autres facteurs d'impact, est le facteur limitant pour le développement de la forêt :

- La consommation d'eau est directement liée à la photosynthèse et par conséquent à la concentration de CO₂ dans l'air ;
- La hausse des températures, en l'absence d'une disponibilité adéquate de l'eau dans le sol, peut entraîner des conditions de sécheresse.

La sécheresse a de nombreux effets directs et indirects sur les écosystèmes forestiers et cette situation critique, désormais évidente dans les zones méditerranéennes, pourrait devenir un facteur limitant également dans les zones montagneuses et alpines. Les effets sont évidents, surtout si le phénomène est important en termes d'intensité et de durée. En 2003, par exemple, le stress causé par la sécheresse et les températures élevées a entraîné une mortalité généralisée dans plusieurs zones forestières européennes. La mortalité se poursuit depuis un certain nombre d'années, avec des comportements différents selon les espèces les plus affectées.

Dans des conditions de sécheresse, l'évapotranspiration des plantes augmente afin de maintenir une température adéquate du feuillage tandis que, en même temps, l'eau du sol est perdue par évaporation. Le déséquilibre qui en résulte génère du stress.

Certaines espèces, parmi lesquelles le hêtre qui revêt une importance particulière du point de vue sylvicole, sont particulièrement sensibles à cet égard. La croissance du bois de hêtre est considérablement réduite à des températures élevées et en l'absence de précipitations. On s'attend donc à ce que son aire de répartition diminue dans les zones méridionales du continent européen (Jump, Hunt, & Penuelas,

2006) et à des altitudes inférieures où la plante est menacée par les espèces les plus xérophiles, alors qu'à des altitudes plus élevées, elle entre en régénération dans les bois de conifères.

Parmi les feuillus, une corrélation entre le déclin des populations de châtaigniers et la sécheresse a également été démontrée. La mortalité des châtaigniers, déjà affectés par de nombreux pathogènes, augmente pendant les périodes sèches (Waldboth & Oberhuber, 2009). Le chêne, par contre, est plus résistant.

En ce qui concerne les conifères, les études réalisées sur la croissance radiale de certaines espèces forestières pendant les saisons de sécheresse de 1976 et 2003 ont montré une plus grande résistance à la sécheresse du sapin argenté par rapport à l'épicéa, ce qui a montré une réduction significative de sa croissance radiale (Vitali, Büntgen, & Bauhus, 2017).

Il est donc évident que la réaction différente des espèces au stress hydrique implique également une altération de leur capacité concurrentielle réciproque et, par conséquent, une variation de la composition des forêts.

La sécheresse affecte aussi directement la flore fongique et réduit la formation de fructifications. De nombreuses études montrent que les champignons mycorhiziens diminuent progressivement. Les causes semblent être nombreuses (p. ex. changements dans l'azote du sol, physiologie des plantes), mais il s'agit notamment de la sécheresse.

Bien qu'aucune étude complète n'ait encore été réalisée, la relation directe entre la flore fongique et la productivité des plantes semble avoir été établie. De nombreuses expériences en serre avec la présence ou l'absence de champignons mycorhiziens témoignent de cette relation, qui se mesure par une baisse de production et une moindre résistance au stress des plantes non mycorhizées (Egli, 2009). Les changements climatiques limitant les champignons, comme la sécheresse, contribueront donc à réduire la résilience globale des écosystèmes.

Les précipitations ont également une influence majeure sur les caractéristiques chimiques, physiques et biologiques des sols forestiers. L'augmentation de la température accompagnée d'une disponibilité adéquate de l'eau entraîne une augmentation de la décomposition de la litière, tandis qu'une augmentation de la température seule, en l'absence de précipitations, pourrait entraîner une augmentation de la décomposition de la litière.

Enfin, il existe une corrélation directe entre l'humidité de la fraction organique du sol et les incendies. Dans ce cas également, l'espèce la plus difficile est le hêtre. Sa faible résilience et résistance au feu couplées à la difficulté de se renouveler après le passage des incendies entraînent le risque que le couvert forestier évolue vers un couvert arbustif.

5.1.4 PROBLÈMES DE NATURE ABIOTIQUE

Le changement climatique, lorsqu'il se manifeste de manière synergique, génère de nombreux impacts de nature abiotique sur les zones forestières, tels que les incendies, les instabilités hydrogéologiques et les tempêtes de vent.

Dans les décennies à venir, à mesure que le changement climatique s'intensifie, on s'attend à ce que l'intensité de ces impacts augmente.

Ces phénomènes, en plus d'interférer directement avec la structure, la composition et les fonctions spécifiques de la forêt, causant la mort des plantes, conduisent souvent à des conditions d'altération, même au détriment du sol.

Il s'agit également de types d'impact qui ont un lien direct avec les questions de protection civile et devront donc être de plus en plus pris en compte.

L'aménagement du territoire devra aussi de plus en plus tenir compte de l'interaction entre les zones urbaines et les zones forestières, car il s'agit de modèles d'utilisation des sols qui, dans des situations d'interface et en présence de changements de paramètres climatiques, génèrent des risques environnementaux réciproques.

Incendies

En plus d'endommager directement le peuplement arboricole et arbustif, les incendies détruisent la matière organique présente dans le sol avec une perte considérable de carbone stocké, et rendent le sol très vulnérable à d'autres facteurs tels que l'eau de ruissellement et le vent qui peuvent laver et enlever la surface du sol, qui n'est plus protégée.

Selon le projet Alp FFIRS (Programme Espace Alpin), entre 2000 et 2009, il y a eu 7 646 incendies avec une superficie totale brûlée de 68 835 hectares dans les Alpes.

Ces dernières années, dans l'ensemble des Alpes, les deux phénomènes suivants ont été observés en termes qualitatifs : un nombre croissant d'incendies s'allument dans des zones qui ne sont pas normalement concernées ; les périodes de risque d'incendie s'élargissent considérablement avec un début précoce au printemps et une prolongation à l'automne.

Ces phénomènes ne peuvent qu'augmenter en relation étroite avec les progrès du changement climatique.

Eboulements

Les forêts jouent un rôle crucial dans la protection contre l'instabilité hydrogéologique.

Dans les écosystèmes forestiers, le bilan hydrique est caractérisé par une phase d'entrée, due aux précipitations et à l'infiltration, et de sortie, due à la transpiration et à l'évapotranspiration. Les processus hydriques impliquent l'ensemble de l'écosystème : l'interception de la pluie se produit au niveau du couvert forestier ; l'infiltration se développe au niveau du sol, et l'évapotranspiration implique les deux. Ces processus régulent, directement et indirectement, les volumes d'eau présents dans le sol, qui sont responsables de la manière dont les débits sortants sont générés. L'équilibre entre les flux entrants (précipitations - interception - infiltration) et les flux sortants indique l'efficacité hydrologique des forêts. Cela se traduit par une réduction du ruissellement, une augmentation du temps de ruissellement et, par conséquent, de la capacité de roulement des bassins (Iovino, 2016).

Cependant, le déséquilibre causé par le changement climatique, et en particulier la concentration des précipitations, peut donner lieu à des dépassements de la capacité de régulation des formations forestières. Dans de telles situations, les perturbations, depuis l'érosion de surface et souterraine jusqu'aux glissements de terrain et aux inondations, peuvent affecter directement le couvert forestier. Les zones qui n'ont pas été recouvertes de végétation à la suite de glissements de terrain ou d'inondations deviennent beaucoup plus vulnérables.

A cet égard, à titre d'exemple, il est utile de garder à l'esprit que, selon l'analyse de l'instabilité des glissements de terrain en Piémont (Colombo & Ramasco, 2005), l'indice des glissements du sol exprimé en pourcentage de l'utilisation dominante des terres (la superficie occupée par les glissements de terrain par rapport à la superficie occupée par chaque classe d'utilisation du sol) a montré une valeur d'environ 15% pour la couverture forestière et une valeur d'environ 27% pour les zones à végétation clairsemée ou absente.

Tempêtes de vent

Les tempêtes de vent sont un phénomène typique des zones forestières du nord de l'Europe, mais on trouve de plus en plus d'évènements venteux dans les régions alpine et méditerranéenne. Ces phénomènes extrêmes peuvent avoir des effets très importants sur les forêts, non seulement en termes de réduction de la production de bois, mais aussi en termes de perte de la capacité de fournir des avantages écosystémiques fondamentaux.

Le vent peut avoir un impact sur les écosystèmes forestiers à différentes échelles, depuis le paysage et le peuplement jusqu'aux arbres individuels. Une combinaison d'effets rend les dommages causés par le vent dans les forêts très différents de ceux d'autres facteurs naturels perturbateurs : à l'échelle du paysage, le vent peut modifier la taille et les caractéristiques des différents types de forêts ; à la surface du sol, en ouvrant le couvert forestier, il influence la quantité de lumière et les ressources disponibles au sol ; et enfin, le déracinement des plantes individuelles crée des conditions microtopographiques et pédologiques particulières qui peuvent persister longtemps.

Les effets du vent sont différents selon la structure des peuplements :

- futaies (conifères et hêtre) : forteresses et déracinement ;
- taillis adultes : arrachage de souches et/ou enlèvement de drageons ;
- jeunes taillis (très rarement) : abattage des matrices.

Les effets du vent peuvent influencer directement la stabilité écologique du peuplement. Les nouvelles ouvertures créées par le vent modifient le microclimat de la forêt, augmentent l'éclairage du sol et affectent directement la régénération du peuplement forestier perturbé.

Une étude a montré une corrélation entre la sécheresse et les coups de vent. La sécheresse affaiblit physiologiquement les plantes en les rendant plus vulnérables à la rupture en raison de la charge à laquelle elles sont soumises pendant les tempêtes de vent. Même les pluies abondantes, qui lessivent le sol, rendent les plantes plus susceptibles de basculer pendant les tempêtes de vent.

Il est donc important de toujours évaluer les effets du vent par rapport à d'autres facteurs d'impact climatique.

5.1.5 PROBLÈMES DE NATURE BIOTIQUE

Les organismes potentiellement nuisibles pour la forêt comprennent les insectes, les nématodes, les phytoplasmes, les bactéries, les champignons, les virus et les viroïdes. Le cycle biologique de tous ces organismes est directement influencé par les paramètres climatiques.

Le changement climatique aura donc un impact sur la dynamique des populations de ces espèces, influençant la fréquence, la taille et la répartition géographique des épidémies et leurs conséquences.

L'équilibre actuel entre hôtes et parasites est donc susceptible d'être perturbé. Par exemple, dans les territoires où les pathogènes ont jusqu'à présent été moins agressifs en raison de la rigidité du climat, les changements peuvent mettre en péril les espèces d'arbres les plus vulnérables.

Non seulement le type de parasites présents peut varier, mais aussi (à long terme) la répartition des espèces d'arbres hôtes, qui entreront alors en contact avec de nouveaux pathogènes.

Les événements catastrophiques, en particulier, peuvent entraîner la propagation soudaine d'agents pathogènes.

Dans ce contexte, il ne faut pas oublier qu'une plus grande invasivité des pathogènes sera corrélée à l'aggravation possible des conditions physiologiques des plantes causée par le phénomène susmentionné d'altération des processus de décomposition de la litière qui réduira, à long terme, la disponibilité des nutriments.

En ce qui concerne plus particulièrement les populations d'insectes, les changements dans la répartition des espèces forestières et le climat influencent la dynamique de l'interaction entre les principales espèces de parasites forestiers.

Les coléoptères (*Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae*) sont normalement présents dans les sapins cassés ou sévèrement stressés. Lorsque les densités de population sont élevées, certaines espèces peuvent coloniser et entraîner la mort d'arbres individuels sains et de noyaux entiers. De nombreuses études ont montré une corrélation entre l'augmentation du nombre de coléoptères et l'augmentation de la température, de la vitesse du vent et de la variabilité des précipitations.

5.1.6 D'AUTRES IMPACTS SUR CERTAINS ASPECTS DE LA PHYSIOLOGIE DES PLANTES

Au cours des dernières années, on a observé de plus en plus de gelées et de chutes de neige tardives. Ces événements n'ont pas encore été suffisamment étudiés, mais ils ont néanmoins eu un impact évident sur le couvert forestier. Les plantes déjà présentes dans la végétation et qui souffrent de gelées tardives doivent refouler les bourgeons et végéter avec le stress physiologique qui s'ensuit.

Le gel et la neige, ou les fortes pluies sur les floraisons, ont également un impact négatif indirect sur la production de miel, comme le montrent les données des dernières années.

Enfin, même les premières chutes de neige, qui se produisent avant la chute des feuilles, peuvent provoquer de graves dégâts, surtout sur des lots de bois récents, avec des noyaux de renouvellement encore peu consolidés et donc particulièrement sujets aux chutes de neige.

5.1.7 SENSIBILITÉ SPÉCIFIQUE

Une étude récente (Frank et al., 2017) menée en Suisse a examiné, à travers l'analyse des variations génétiques, la capacité à s'adapter à trois différentes projections du changement climatique de trois espèces importantes pour les forêts alpines : l'épicéa (*Picea abies*), le sapin (*Abies alba*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*).

L'étude a montré qu'une adaptation génétique insuffisante est susceptible d'être critique d'ici la fin du siècle pour le hêtre et l'épicéa, tandis que le sapin devrait se révéler plus résistant.

5.2 IMPACTS SOCIO-ECONOMIQUES

L'action conjointe des différents facteurs influençant le changement climatique a également une influence directe sur le comportement humain qui, en évoluant en fonction des conditions climatiques générales, a à son tour un impact sur les écosystèmes forestiers.

L'extension de la saison chaude prolonge la saison de travail dans la forêt. Par exemple, il a été constaté que l'absence quasi totale de neige dans certaines zones alpines au cours de l'hiver 2015/2016 a permis aux entreprises forestières de travailler en continu dans la forêt. L'impact n'a pas encore été évalué en détail, mais il a été constaté que le temps nécessaire à l'exploitation des lots a été réduit, que la disponibilité du bois de chauffage a considérablement augmenté et que le marché est devenu saturé en conséquence. L'effet sur la forêt s'est fait sentir l'année suivante avec l'absence de coupe de nombreux lots forestiers matures et le non-alignement des pratiques sylvicoles par rapport aux prévisions des plans forestiers.

La hausse des températures au cours des derniers hivers a également eu un impact significatif sur la dynamique du marché du bois de chauffage : si la demande globale de combustible a diminué, la demande de bois de chauffage a néanmoins augmenté, puisque très souvent, dans les zones rurales, le chauffage central, utilisant des combustibles fossiles, est complété par le chauffage au bois et les températures

élevées ont rendu suffisante l'utilisation de poêles au détriment des systèmes de chauffage central dans les bâtiments.

6 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR L'ENVIRONNEMENT BÂTI

6.1 INTRODUCTION

Les études dédiées aux conséquences du changement climatique sur l'environnement alpin sont principalement axées sur les aspects environnementaux et les impacts économiques du secteur du tourisme. Cependant, la littérature sur les impacts du changement climatique sur l'environnement bâti est plutôt limitée : la question n'est pas encore devenue un débat scientifique à part entière. Le *Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat* (GIEC) n'a également inclus un chapitre sur les établissements et les zones urbaines que depuis le quatrième rapport d'évaluation (RE4) de 2007, alors qu'auparavant cette question était traitée dans d'autres chapitres. Depuis lors, cependant, on reconnaît de plus en plus la contribution des zones urbaines aux émissions de gaz à effet de serre et leur rôle potentiel dans l'atténuation des changements climatiques.

La plupart des études reliant le changement climatique à l'environnement bâti prennent en compte les impacts dans les grandes agglomérations urbaines, principalement en raison de la croissance urbaine continue dans le monde, notamment en termes de production de CO₂ (IPCC, 2014), alors que les petites villes (typiques de l'espace alpin) ne sont pas prises en compte. Les seules études sur les petits systèmes d'habitat concernent les mesures d'adaptation au changement climatique avec une localisation géographique spécifique : les pays en développement.

Cependant, un bon nombre d'éléments concernant les impacts du changement climatique sur l'environnement bâti se retrouvent dans d'autres volets de la littérature sur le changement climatique, tels que : (a) les impacts directs et indirects du changement climatique sur la charge anthropique (disponibilité des ressources, besoins énergétiques croissants, impacts sur l'agriculture et vulnérabilité croissante des infrastructures), et (b) les impacts à l'échelle des bâtiments. Dans les paragraphes suivants, nous résumerons une vue d'ensemble des impacts directs et indirects sur les systèmes de logement qui peuvent être extrapolés à partir des scénarios de changement climatique prévus pour l'espace alpin.

6.2 IMPACTS DIRECTS ET INDIRECTS SUR LE SYSTÈME DE PEUPLEMENT

Dans le cadre du projet *CLISP - Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space* (Alpine Space 2007-2013), ont été identifiées de manière synthétique les chaînes d'impacts générés par le changement climatique sur des secteurs spécifiques. L'image suivante montre les impacts sur l'environnement bâti à partir de trois déterminants et en tenant compte des impacts intermédiaires, connexes et non connexes, ainsi que des impacts finaux (figure 6.1)

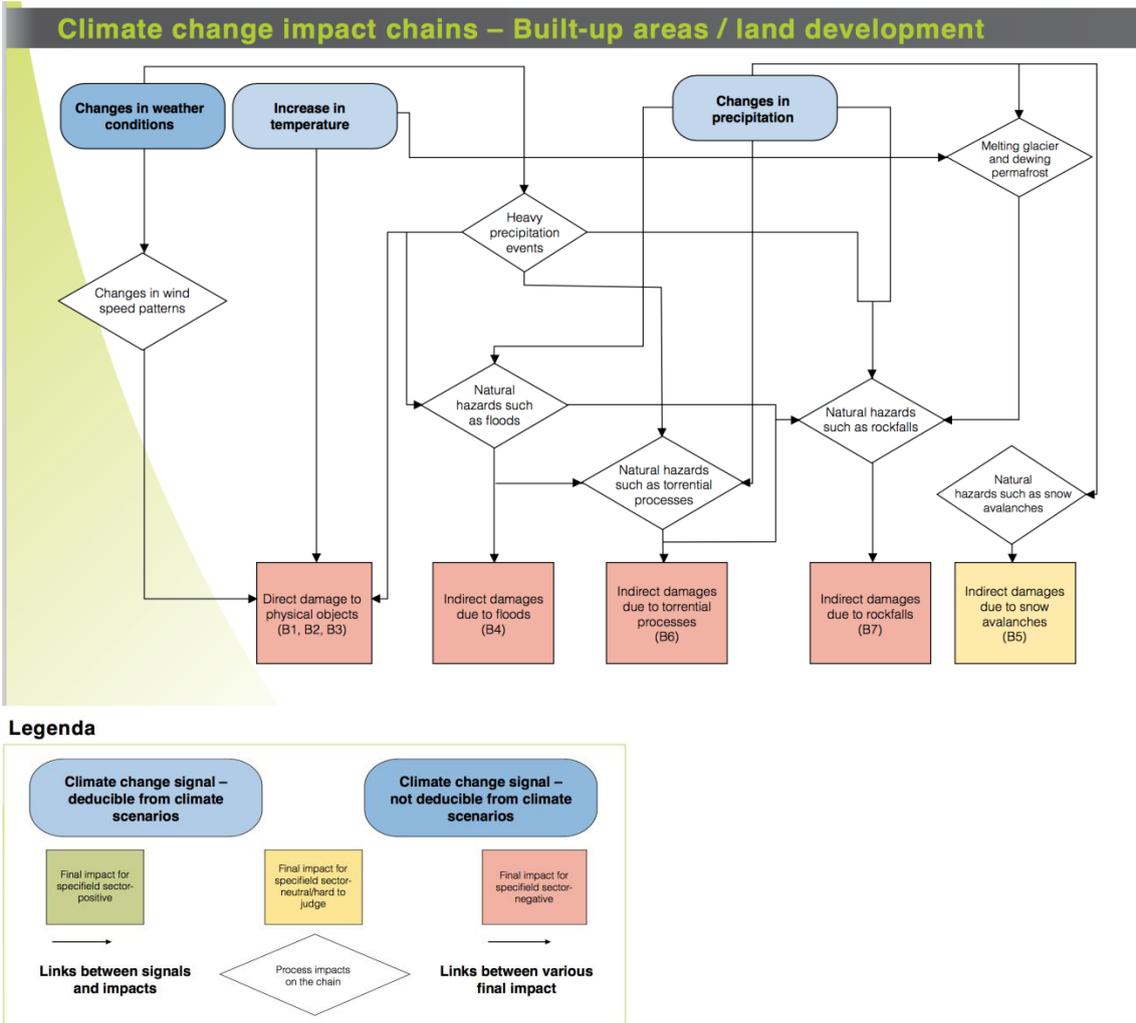


FIGURE 6.1. LA CHAÎNE D'IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT BÂTI. SOURCE : CLISP, 2012

Comme on peut le constater, des impacts directs et indirects sur l'environnement bâti sont attendus en raison de la plus grande incidence des phénomènes climatiques extrêmes, ce qui entraînera une augmentation du risque hydrogéologique et des coûts économiques qui y sont liés. Comme mentionné dans les chapitres 1 et 2, les simulations climatiques régionales prévoient des changements drastiques dans le système hydrologique alpin avec des changements majeurs dans le cycle de l'eau, la fabrication de neige et le stockage des glaciers, provoquant d'une part une augmentation de la période de sécheresse et d'autre part une augmentation des précipitations exceptionnelles. Le versant sud des Alpes sera particulièrement affecté par les effets de l'exposition aux flux chauds du climat méditerranéen. Le risque hydrogéologique - qui est déjà considérable en Italie, en particulier dans la vallée du Pô, et en France dans les zones frontalières du sud-est - ne peut qu'augmenter, en exerçant une plus grande pression sur les structures de logement, les infrastructures touristiques et de transport et en augmentant les coûts, non seulement en termes économiques, mais aussi en termes humains pour les communautés résidentes (Carraro, Crimi, & Sgobbi, 2007). Aujourd'hui on constate une augmentation des dommages et des coûts dus aux glissements de terrain et aux avalanches, en particulier sur les infrastructures et les zones résidentielles. En particulier, les dommages causés aux infrastructures ont des répercussions sur l'accessibilité de la zone bâtie, ce qui peut générer un isolement de certaines zones bâties et donc conduire à une augmentation du nombre de personnes abandonnant des terrains élevés. En plus des dommages

causés aux infrastructures de mobilité, on note aussi les dommages causés aux infrastructures d'eau, d'électricité et de téléphone, qui sont déjà à la traîne dans les régions montagneuses les plus reculées.

Le changement climatique aurait également un impact significatif sur l'utilisation de la montagne et les pratiques de vie. L'une des principales activités économiques de l'espace alpin est le tourisme, qui dépend fortement des conditions climatiques et des ressources naturelles tant en hiver qu'en été (Serquet & Rebetez, 2011). Comme nous le verrons en détail au chapitre 8, les impacts du changement climatique sur le secteur du tourisme représentent le principal champ d'intérêt de la littérature actuelle, précisément en raison de la valeur économique élevée du secteur (Becken, 2013). En fait, on estime que le secteur du tourisme est en mesure de générer environ 50 milliards par an dans l'espace alpin. Les températures plus élevées auront un impact sur le tourisme sur toutes les saisons. Depuis déjà une dizaine d'années, on assiste à une diminution de l'enneigement, différent en fonction de l'altitude, avec une augmentation des coûts due à des pratiques d'enneigement artificiel de plus en plus fréquentes. Si les températures augmentent, ces coûts sont susceptibles d'augmenter, surtout si l'on tient compte de la consommation d'énergie et de l'utilisation accrue de l'eau (EEA, 2009). De plus, comme déjà mentionné, l'augmentation (en fréquence et en durée) du risque de glissements de terrain, d'avalanches et d'inondations peut également entraîner une augmentation des coûts d'entretien et des dépenses pour les activités de prévention et de protection des villages touristiques et des remontées mécaniques. Tous ces impacts économiques affectent également les zones marginales en termes de bien-être économique, les petites villes où, dans certains cas, il y a peu de marges du point de vue des ressources publiques. La réduction de la couverture de neige et des glaciers soulève également la question de la conversion des refuges de ski alpin d'été de moins en moins utilisées.

En même temps, l'allongement de l'été a également des effets apparemment positifs sur l'augmentation de la fréquentation estivale. Les touristes semblent déjà réagir aux vagues de chaleur en prolongeant leur séjour en montagne, surtout à basse altitude, et à l'avenir, si les vagues de chaleur deviennent plus régulières, ils pourraient encore augmenter leurs nuitées en été (Serquet & Rebetez, 2011). Toutefois, l'augmentation des flux touristiques peut également constituer une menace. Les pressions anthropiques accrues peuvent détériorer l'environnement naturel et avoir de graves effets négatifs sur les services écosystémiques tels que la disponibilité des ressources en eau (Beniston, 2003). Une diminution de la disponibilité des ressources en eau aurait un impact majeur sur tous les secteurs qui dépendent de l'eau, notamment l'agriculture, la production hydroélectrique, l'approvisionnement en eau potable et le tourisme (Hohenwallner, 2011). Les problèmes liés à l'eau peuvent accroître le risque de conflits non seulement entre les usagers de l'espace alpin (en particulier dans les Alpes du Sud), mais aussi entre ces derniers et les usagers extérieurs aux Alpes, où les sécheresses sont appelées à devenir plus fréquentes. Du côté italien, depuis 1960, le Pô a connu une augmentation de la température moyenne annuelle de l'eau de 2°C et devrait augmenter de 3-4°C d'ici la fin du siècle, tandis que du côté français, le Rhône a vu ses débits annuels moyens diminuer en raison de la réduction des glaciers (EEA, 2009).

Du point de vue de l'environnement bâti, l'allongement des séjours des touristes ou l'arrivée de nouveaux habitants saisonniers fuyant les îlots de chaleur des zones urbaines de la plaine pourraient conduire à une nouvelle vague de consommation foncière due au phénomène des résidences secondaires, en particulier dans les zones de montagne proches des grandes villes, où l'on observe déjà dans les années 1980 et 1990 l'émergence de zones résidentielles secondaire et touristique d'hiver. Certains types d'activités économiques peuvent également envisager de déménager ou de s'ouvrir à la montagne, ce qui entraînerait une augmentation de la production de CO₂. En plus des impacts négatifs déjà mis en évidence ci-dessus liés à une charge anthropique plus élevée, il convient de garder à l'esprit qu'une augmentation de la population peut également générer de nouveaux îlots de chaleur avec des impacts sur la consommation d'électricité dans le secteur du bâtiment. Cela pourrait entraîner une augmentation de la demande d'énergie nécessaire au refroidissement des bâtiments en été et une diminution de l'énergie nécessaire au chauffage en hiver (Santamouris, Cartalis, Synnefa, & Kolokotsa, 2015 ; Spinoni et al., 2017).

Cela affectera également le secteur de la construction dans la région alpine, qui devra atteindre des objectifs d'efficacité énergétique toujours plus élevés. En fait, il faudra modifier le comportement thermique des bâtiments, en mettant davantage l'accent sur les changements de température (événements aux températures extrêmes) et les problèmes de refroidissement en été.

Enfin, l'augmentation de la fréquence des sécheresses, des températures élevées et une faible humidité entraînera également une augmentation du risque d'incendies avec une menace croissante pour les zones résidentielles, comme cela a déjà été enregistré du côté ouest de l'Italie en octobre 2017 (Val di Susa, Valle Orco, Val Noce, Val Chisone et Val Germanasca parmi les zones les plus touchées). Aujourd'hui, le manque d'attention portée à la prévention par la création et l'entretien de coupe-feu, le nettoyage des sous-bois, des bandes latérales de routes et des lignes de communication augmente l'exposition de ces zones aux feux de forêt.

7 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE

7.1 INTRODUCTION

La littérature scientifique sur la relation entre le changement climatique et le tourisme était plutôt limitée jusqu'au début des années 2000, puis s'est développée très rapidement, au point d'être reconnue aujourd'hui comme un objet disciplinaire en soi (Becken, 2013). Cependant, il existe encore quelques nœuds théoriques et méthodologiques critiques dans la connaissance concernant (1) les impacts du changement climatique sur le tourisme et ses stratégies d'adaptation, et (2) la contribution du secteur du tourisme au changement climatique (Hall, 2008).

Certaines études ont tenté d'estimer, au moyen de simulations modélisées, comment les flux touristiques pourraient changer en raison du changement climatique, tant au niveau mondial (voir, par exemple, Hamilton, Maddison, & Tol, 2005, et Lise & Tol, 2002), et plus spécifiquement en Europe (Amelung & Moreno, 2012 ; Amelung & Viner, 2006). Ils se sont basés sur l'utilisation de l'*Indice Climatique Touristique* (TCI), introduit pour la première fois par Mieczkowski (1985), qui mesure le confort climatique d'une zone donnée comme facteur d'attraction pour les touristes sur la base d'indices relatifs à la température, l'humidité, la pluviométrie, les heures de lumière et le vent. Les scénarios décrivant comment les TCI changeront en Europe de 2005 à 2080 à la suite du changement climatique montrent que l'impact global au niveau continental pourrait être positif, avec une augmentation de la fréquentation, mais avec une répartition inégale entre les pays. En particulier, les pays d'Europe du Nord comme la Grande-Bretagne, l'Allemagne, les Pays-Bas et les pays scandinaves gagneraient des touristes, au détriment des pays d'Europe du Sud comme l'Espagne, l'Italie et la Grèce. D'autres pays qui pourraient voir une augmentation du nombre de visiteurs sont ceux qui ont des altitudes moyennes, comme l'Autriche, parce que, malgré des augmentations significatives de température, le pays conservera un TCI intéressant du fait de ses altitudes, comparativement à des zones de basse altitude (Amelung & Moreno, 2012). Toutefois, il faut garder à l'esprit que les TCI ne font pas de différence entre les valeurs saisonnières et ne permettent donc pas de désagréger l'effet du changement climatique entre l'hiver et l'été, bien que cette différence soit substantielle dans le cas du tourisme de montagne.

7.2 LE TOURISME DANS LES ALPES

Le tourisme est l'une des activités les plus importantes pour les communautés alpines. Les Alpes comptent chaque année 60 à 80 millions de touristes, une valeur égale à 4 à 6 fois la population locale. Le tourisme génère un chiffre d'affaires d'environ 50 milliards d'euros par an et représente 10 à 12% de l'emploi, même s'il ne touche que 10% des communautés locales (Agrawala, 2007).

Les Alpes représentent la principale destination de montagne en Italie, représentant 90% des présences touristiques dans les zones de montagne, réparties de la manière suivante : 70-75% dans les Alpes de l'Est, 15-20% dans les Alpes centrales et occidentales. La saison hivernale (décembre-mars) représente environ 40% du nombre total de touristes dans les régions alpines (Machiavelli, 2011).

En France aussi, les Alpes sont la première destination de montagne pour le tourisme d'hiver. En France, 77,5 % de la fréquentation touristique des Alpes est concentrée en hiver, dont 37 % en Savoie et 32 % en Haute-Savoie (Abegg, Agrawala, Crick, & de Montfalcon, 2007).

On compte 666 stations de ski dans les Alpes, 228 en Autriche, 164 en Suisse, 148 en France (42 en Savoie et 37 en Haute-Savoie), 87 en Italie (18 en Piémont) et 39 en Allemagne (Abegg et al., 2007).

7.3 LA RÉLATION ENTRE TOURISME ALPIN HIVERNAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le tourisme dans les Alpes dépend fortement des conditions climatiques et des ressources naturelles, tant en hiver qu'en été. Pour cette raison, l'étude de la dynamique du changement climatique - qui est particulièrement importante dans l'espace alpin - est essentielle pour comprendre son impact sur l'évolution du secteur du tourisme à moyen et long terme (Balbi, 2012).

En ce qui concerne le tourisme alpin hivernal, le facteur clé est la neige, qui est l'attraction principale. Dès la fin des années 1980, une baisse des précipitations neigeuses (particulièrement au cours des saisons 1987-1988 à 1989-1990) avait mis en lumière la forte dépendance de l'industrie du tourisme hivernal à l'égard de la présence de neige. En Suisse (Koenig & Abegg, 1997), le chiffre d'affaires des remontées mécaniques a diminué en moyenne de 20 % par rapport à l'hiver "normal" de l'année précédente. L'impact était cependant différencié en fonction de l'altitude : les stations de ski situées à des altitudes plus élevées avaient obtenu de meilleurs résultats que les années précédentes, car elles avaient bénéficié de l'absence de neige dans les moyennes et basses montagnes. Dans les années 1990, ces événements ont conduit, en Suisse, au lancement d'études sur les effets potentiels du changement climatique sur le tourisme : les premières estimations des coûts annuels potentiels du changement climatique pour 2050 étaient de 0,6-0,8 % du PIB en 1995 (Elsasser & Bürki, 2002). Une enquête menée auprès des touristes suisses à la fin des années 1990 a montré que le changement climatique était déjà perçu comme un problème majeur chez les touristes d'hiver et que la fiabilité de l'enneigement était l'élément clé pour les touristes : 49 % des personnes interrogées ont déclaré que, face à la perspective de 5 hivers peu enneigés successifs, elles se dirigeraient vers des stations de ski qui garantiraient une plus grande certitude d'enneigement ; 32 % accepteraient de skier moins ; 4 % arrêteraient le ski (Behringer, Buerki, & Fuhrer, 2000). L'organisation d'événements et d'autres attractions n'était pas considérée par les skieurs comme un facteur pouvant compenser la rareté de la neige (Elsasser & Messerli, 2001). Une enquête plus récente menée en Autriche (Unbehaun, Pröbstl, & Haider, 2008) confirme la centralité de la neige pour le tourisme alpin d'hiver : la principale stratégie d'adaptation des skieurs à la présence réduite de neige est de voyager plus pour atteindre des stations de ski plus élevées ; l'offre d'activités touristiques diversifiées semble avoir des effets limités.

Compte tenu du caractère central du facteur neige, les effets du changement climatique sur le tourisme alpin hivernal sont étroitement liés à la manière dont ce changement affectera l'enneigement. D'une part, les scénarios de changement climatique dans les Alpes prévoient une augmentation des températures moyennes, tant en été qu'en hiver. D'autre part, on s'attend à plus de chutes de neige à haute altitude et plus de pluie à basse altitude. Dans l'ensemble, en hiver, le premier effet prévaudra sur le second, c'est-à-dire que de plus fortes chutes de neige ne suffiront pas à compenser les températures plus élevées : on anticipe donc une réduction de la couche de neige, moins accentuée à haute altitude et plus significative à basse altitude, avec une durée globale d'enneigement plus courte (arrivée tardive des chutes de neige et fin précoce) (Hantel & Hirtl-Wielke, 2007).

L'un des critères qui identifie la "fiabilité" d'une station de ski pour les touristes, c'est-à-dire qu'elle offre une garantie suffisante de neige, est la règle dite des "cent jours", introduite par Witmer (1984) : elle définit comme « fiable » un domaine de ski dont l'enneigement est d'au moins 30-50 cm (selon la pente) pendant au moins 100 jours, pendant 7 hivers sur 10 et cela durant la période du 1er décembre au 15 avril.

Actuellement, cette règle est respectée à des hauteurs différentes dans les différentes régions alpines. En Autriche, en Suisse et en Allemagne, elle dépasse les 1 200 mètres, voire moins (1 050 m) dans certaines régions. Dans toutes les Alpes italiennes, elle ne se trouve qu'au-dessus des 1 500 mètres. En France, elle est respectée à plus de 1 200 mètres dans certaines régions comme la Savoie et la Haute-Savoie, et à plus de 1 500 mètres dans les Alpes de Haute-Provence et les Alpes Maritimes. Dans l'ensemble, 91 % des 666

stations de ski alpin identifiées par Abegg et al (2007) respectent désormais cette règle : dans la plupart des Alpes, la saison de ski dure actuellement plus de 120 jours.

Les effets attendus du changement climatique, en termes d'augmentation des températures et de changements dans les chutes de neige, semblent cependant susceptibles de modifier significativement ce scénario. **En particulier, on estime que toute augmentation de 1°C de la température moyenne annuelle entraînera une augmentation de 150 mètres de la ligne au-delà de laquelle la règle des 100 jours est respectée.** En conséquence, il y aura une réduction du nombre de stations de ski qui peuvent être considérées comme « fiables » en termes de conditions d'enneigement :

- avec une augmentation de la température de 1°C, on comptera 500 stations de ski fiables, soit 75% des 666 stations actuelles ;
- avec une augmentation de 2°C : 404, soit 61% des actuelles ;
- avec une augmentation de 4°C : 202, soit 30% des niveaux actuels.

En termes de région, c'est la région alpine allemande qui sera la plus touchée par cet effet : l'augmentation de 1°C entraînera une réduction de 60% des domaines skiables fiables. La Suisse, en revanche, sera la moins touchée : même avec une augmentation de 2°C, 80% de ses domaines de ski resteront fiables. Dans le cas de la France, l'impact sera supérieur à l'impact moyen sur l'arc alpin, avec une réduction des 143 stations de ski actuellement fiables de 14% pour 1°C, 33% pour 2°C et 62% pour 4°C. Dans le cas de la Savoie, la réduction serait plus limitée (-5% pour 1°C, -10% pour 2°C, -29% pour 4°C) mais beaucoup plus élevée pour la Haute Savoie (-23% pour 1°C, -49% pour 2°C, -80% pour 4°C). L'Italie, en revanche, se trouve dans une situation légèrement meilleure que la moyenne, du moins pour les dernières décennies, avec une réduction attendue dans les domaines skiables fiables de 12% des 81 actuels pour 1°C, 27% pour 2°C et 74% pour 4°C. Dans ce contexte national, le Piémont subirait des impacts plus limités : -11% pour 1°C, -17% pour 2°C, -72% pour 4°C.

Quant aux délais dans lesquels ces scénarios pourraient se matérialiser, Abegg et al (2007) avancent une augmentation de 2°C pour l'année 2050 par rapport à 2010, et de 4°C pour 2100. Gobiet et al (2014), dans leur revue des simulations réalisées avec des modèles climatiques régionaux dans les Alpes, arrivent à un scénario peu différent, même s'il est légèrement plus atténué : +1,5°C au milieu du siècle, +3,3°C à la fin du 19^{ème} siècle.

Le résultat de ce scénario pourrait être une dynamique sélective de " gagnants et perdants ", avec une concentration de touristes d'hiver sur les stations de ski situées aux altitudes les plus élevées et les mieux équipées, c'est-à-dire ceux capables d'assurer une plus grande fiabilité en matière de neige et de soutenir les investissements nécessaires pour promouvoir cette fiabilité, typiquement par l'enneigement artificiel. D'autre part, les stations de basse altitude ou les stations de moyenne-haute altitude qui, en raison de leur petite taille, ne sont pas en mesure de faire face aux investissements nécessaires à la mise en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique, risquent de devenir financièrement insoutenables. Cependant, le risque de cette évolution pourrait être négatif, dans l'ensemble, à long terme, également pour les " gagnants " : les stations de basse altitude sont en effet fréquentées principalement par des skieurs débutants et occasionnels, et leur fermeture risque de diminuer l'initiation à la pratique du ski des nouvelles générations (Elsasser & Messerli, 2001).

La stratégie d'adaptation au changement climatique la plus répandue dans les Alpes est l'utilisation de la neige artificielle (Wolfsegger, Gössling, & Scott, 2008) : aujourd'hui déjà, dans certaines régions des Alpes italiennes, elle peut être garantie sur 100% des pistes (Rixen et al., 2011). Toutefois, cette stratégie connaît des limites physiques et économiques. Tout d'abord, en raison des températures plus élevées, l'enneigement artificiel peut ne pas être réalisable à la fin de l'automne / début de l'hiver, juste au moment où la couche de neige de base des pistes doit être créée (Steiger & Mayer, 2008). Selon Steiger (2010), l'enneigement artificiel est une stratégie d'adaptation qui ne sera probablement pas efficace au-delà du milieu du 21^{ème} siècle. A titre d'exemple, d'ici 2080, la production de neige artificielle, soit 330% des

niveaux actuels, serait nécessaire dans la région autrichienne du Tyrol pour assurer le respect de la règle des 100 jours, à un coût insupportable. Plus encore que la consommation d'énergie, le plus grand impact négatif de la neige artificielle est lié à la consommation d'eau (Rixen et al., 2011) : 70-120 litres d'eau sont nécessaires pour assurer une couverture de 20-35 cm de neige sur un mètre carré ; si toutes les pistes de ski alpin actuellement équipées de ce type de système étaient recouvertes de neige artificielle, la consommation d'eau serait égale à la consommation annuelle d'une ville de 1,5 million d'habitants (Abegg et al., 2007). De plus, l'enneigement semble avoir un impact sur la faune et la biodiversité (Wipf, Rixen, Fischer, Schmid, & Stoeckli, 2005). Enfin, elle risque d'accentuer l'effet de sélection entre les stations de ski : seules les grandes stations de ski peuvent se permettre des installations d'enneigement artificiel ; par conséquent, les petites stations de ski et celles situées à basse altitude risquent de dépérir ; dans le même temps, même pour les grandes stations de ski, les coûts d'une utilisation accrue des installations d'enneigement artificiel risquent de déclencher un cercle vicieux entre des coûts d'exploitation plus élevés, une montée en gamme des touristes et donc une diminution de leur présence (Unbehaun, Pröbstl, & Haider, 2008).

D'autres stratégies d'adaptation peuvent également présenter des risques d'inefficacité ou d'impacts significatifs en termes d'écosystèmes. Les pratiques de modification des pistes, visant à obtenir des pentes plus grandes pour réduire l'épaisseur de la couche de neige nécessaire pour le ski, peuvent entraîner des dommages importants sur la flore et une défiguration du paysage, avec des effets négatifs sur le tourisme estival. Le déplacement du ski vers des altitudes de plus en plus élevées et vers le nord entraîne un risque accru d'avalanches et de vents forts, ainsi que l'exigence de skier sans exposition adéquate au soleil ; il introduit également des pressions anthropiques importantes sur des milieux qui, précisément en raison de leur altitude, sont particulièrement fragiles d'un point de vue écosystémique (Abegg et al. 2007).

7.4 LA RELATION ENTRE TOURISME ALPIN ESTIVAL ET CHANGEMENT CLIMATIQUE

En ce qui concerne le tourisme estival, l'impact du changement climatique pourrait être à certains égards bénéfique pour les territoires alpins, car il pourrait accroître leur attractivité relative : la hausse des températures dans les zones de plaine, principalement liée à l'effet "îlot de chaleur", pourrait favoriser un plus grand afflux de personnes en provenance des zones urbaines pendant les mois d'été.

Par exemple, Serquet & Rebetez (2011) ont analysé la relation entre les tendances de température à basse altitude et le nombre de visiteurs dans 40 stations alpines suisses : une corrélation significative est apparue, particulièrement évidente en juin (lorsque la présence dans les montagnes est généralement plus occasionnelle qu'en juillet et août) et pour les stations situées plus près des villes. En d'autres termes, la surchauffe des zones urbaines à basse altitude pourrait augmenter le nombre de touristes qui, en été (non seulement pendant les mois de vacances, mais aussi et surtout au début d'été), "fuiant" les villes les week-ends pour se rafraîchir dans les zones alpines. **En ce sens, le changement climatique pourrait favoriser les régions de moyenne montagne, encore plus que les régions de haute montagne.**

Une autre opportunité liée au changement climatique pour le tourisme d'été dans les régions de moyenne montagne pourrait provenir de la synergie avec l'agriculture. Le risque d'une diminution du nombre de touristes en hiver pourrait avoir un impact négatif sur le chiffre d'affaires des exploitations agricoles locales ; celles-ci pourraient alors être incitées, en réaction, à augmenter leur activité agricole grâce aussi à une plus grande disponibilité de terres arables (et sur des périodes plus longues) dérivant du changement climatique : l'offre de produits agricoles locaux typiques pourrait être un facteur d'attraction supplémentaire pour les touristes d'été (Behringer, Buerki, & Fuhrer, 2000).

Par ailleurs, le changement climatique pourrait avoir un impact négatif sur l'attractivité des zones alpines, non pas tant en relation directe avec la hausse des températures, mais plutôt en relation avec ses effets sur la disponibilité des ressources en eau et sur l'augmentation de la fréquence et de l'ampleur des

catastrophes naturelles. En particulier, l'un des attraits croissants de la montagne en saison estivale pourrait devenir la possibilité de pratiquer des activités d'eau vive : canyoning, rafting, kayak, canyoning, etc... Cependant, ces activités dépendent beaucoup du régime hydrique des torrents alpins, qui pourrait être considérablement réduit à l'avenir en raison de précipitations plus faibles (bien qu'il reste à comprendre dans quelle mesure cette diminution pourrait être compensée par une fonte plus importante des glaciers). De plus, une augmentation du nombre de visiteurs touristiques pendant la saison estivale pourrait accroître la pression en termes de demande d'eau potable, affectant encore plus négativement les ressources disponibles (Hohenwallner, 2011).

D'autres activités typiques du tourisme de montagne, liées à l'utilisation des ressources naturelles et du paysage, comme la randonnée, l'escalade, le VTT, etc., pourraient être menacées par l'augmentation des risques naturels, comme les chutes de pierres et de glace pour la fonte des glaciers, les glissements de terrain et les coulées de boue en raison de l'incidence accrue des précipitations extrêmes, etc. (Urbanc & Pipan, éd., 2011). Ces risques peuvent également affecter l'utilisabilité des infrastructures garantissant l'accessibilité des zones de montagne aux touristes (Pütz et al., 2011).

Cependant, dans l'ensemble, il est peu probable que la croissance possible du tourisme estival compense la baisse probable des activités de sports d'hiver. L'étude de Müller & Weber (2008) le montre en essayant de simuler la réduction du chiffre d'affaires dans le secteur du tourisme en raison de l'impact du changement climatique dans l'Oberland bernois. Bien que cette région soit caractérisée par la présence de nombreuses stations de ski en haute altitude, donc moins sujettes aux effets négatifs du changement climatique, le chiffre d'affaires en 2030 devrait baisser de 30% en hiver par rapport à 2006. L'augmentation du chiffre d'affaires estimée pour la saison estivale de 7% ne serait pas suffisante pour compenser la perte hivernale : globalement, le chiffre d'affaires annuel serait réduit de 7%. Selon les prévisions des auteurs, l'adoption de mesures d'adaptation au changement climatique permettrait de contenir ces pertes, mais sans les éliminer complètement : le chiffre d'affaires hivernal diminuerait de 22 %, pour un total annuel de 4 %.

8 LES IMPACTS TRANSVERSAUX ET LES SERVICES ECOSYSTEMIQUES

8.1 LA MATRICE INTERSECTORIELLES DES IMPACTS

Comme le montre l'analyse effectuée dans les chapitres précédents, certains des impacts sectoriels du changement climatique ne se limitent pas à ces secteurs, mais finissent par se propager d'un secteur à l'autre, générant des impacts « intersectoriels ».

Les risques naturels, en particulier, jouent un rôle important dans cette approche intersectorielle, affectant à la fois l'environnement naturel et l'environnement créé par l'homme et, en fin de compte, impliquant tous les secteurs.

	Risques naturels	Biodiversité	Forêts	Agriculture	Tourisme	Env. bâti
Risques naturels		Des espèces plus sensibles ont disparu.	L'augmentation de la mortalité forestière provoque des événements extrêmes.	Plus de dommages aux cultures.	Dommages accrus aux installations. Vulnérabilité accrue des utilisateurs.	Dommages accrus aux biens et aux personnes. Coûts d'entretien accrus. Diminution de l'accessibilité.
Biodiversité			Dommages aux forêts dus à l'augmentation des phytopathologies	Augmentation des phytopathologies. Augmentation de la population d'animaux sauvages en interaction avec l'agriculture et l'élevage. Aggravation des conditions de travail des bergers.	Augmentation des parasites et des possibilités de transmission des maladies.	Présence accrue d'animaux sauvages dans les centres de population.
Forêts	Instabilité du sol. Débit de surface réduit. Délais de livraison plus longs.	L'augmentation des incendies peut menacer certaines espèces animales et végétales.		Elargissement des forêts au détriment des terres agricoles (rentabilité particulièrement faible).	Menace sur les plants. Vulnérabilité accrue des utilisateurs.	Risque accru d'incendie dans les zones et les habitations dispersées. Vulnérabilité accrue des infrastructures. Qualité de l'air aggravée en raison de l'augmentation des incendies (augmentation du CO ₂).
Agriculture	Abandon de terres à faible productivité.	Nouvelles cultures d'espèces non indigènes résistantes aux			Disponibilité réduite de la production locale.	Disponibilité réduite de la production locale.

		nouvelles conditions climatiques au détriment des espèces indigènes.				Perte de rentabilité et d'emplois.
Tourisme	Les changements de pistes dus aux pénuries de neige augmentent le risque de perturbation.	Asphyxie de la couverture végétale des sols enneigés artificiellement et donc retard de l'activité végétative.		La baisse du tourisme hivernal réduit la demande de certains produits locaux. L'augmentation du tourisme estival peut ne pas correspondre à la capacité des producteurs locaux à fournir des produits.		Augmentation du nombre d'habitants saisonniers avec pour conséquence la consommation de terres (en raison de l'augmentation possible du nombre de résidences secondaires) et l'augmentation de la consommation d'eau et d'électricité.
Env. bâti	Abandon des territoires de montagne.	Augmentation des travaux d'aménagement hydraulique au détriment des milieux naturels.	La diminution des besoins en chauffage peut entraîner une perte de rentabilité pour le secteur forestier.	Dans les basses et moyennes vallées, des conditions climatiques plus douces peuvent favoriser l'expansion du bâti au détriment des terres agricoles.		

TABLEAU 8.1. LA MATRICE DES IMPACTS INTERSECTORIELS

L'eau joue un rôle tout aussi important : de nombreuses dynamiques du changement climatique peuvent conduire, d'une part, à une réduction des ressources en eau disponibles et, d'autre part, à une augmentation de leur consommation. Ce mécanisme peut conduire à des conflits et à la concurrence entre les secteurs pour l'accès et l'utilisation de cette précieuse ressource.

Dans le tableau 8.1, les impacts intersectoriels résultant des analyses des chapitres précédents sont résumés dans une matrice à deux entrées : sur les lignes les secteurs qui déterminent les impacts sur les secteurs indiqués dans les colonnes. Chaque encadré résume donc les principaux impacts du changement climatique qui, du secteur en ligne, affectent le secteur en colonne.

8.2 SERVICES ÉCOSYSTÉMIQUES

Afin d'étudier les effets intersectoriels des impacts du changement climatique, il a été convenu de procéder à une évaluation économique des services écosystémiques (SE).

Pour le projet ARTACLIM, l'évaluation économique des SE présente deux avantages indiscutables :

- elle permet la prise en compte simultanée des impacts exercés par le changement climatique sur tous les secteurs d'activité et les composantes environnementales considérées comme

récepteurs d'impact (tourisme, environnement bâti, risques naturels, biodiversité, agriculture, forêts) ;

- elle permet d'exprimer la valeur actuelle des SE (lignes de base) en valeurs monétaires (euros), ainsi que la valeur qui pourrait être déterminée à la suite de l'émergence du changement climatique dans les différents scénarios, facilitant ainsi les activités de communication et de diffusion.

8.2.1 MÉTHODOLOGIE

Pour la détermination de la base de référence, il a été fait appel aux données issues d'une étude publiée en 2012, qui a abouti à une estimation de la valeur économique des SE produits au niveau des provinces italiennes (Scolozzi, Morri, & Santolini, 2012).

La méthodologie adoptée par l'étude est basée sur trois étapes :

- l'examen de la littérature économique pour définir un marché de substitution, par exemple une collecte de la valeur monétaire des services écosystémiques fournis par chaque couverture terrestre (LC) ;
- la consultation d'experts, par la formation de groupes de discussion et l'application de la méthode Delphi, afin d'estimer le poids à accorder aux différentes couvertures terrestres qui fournissent des services écosystémiques, en tenant également compte de certaines caractéristiques spatiales telles que l'altitude et la distance par rapport aux zones urbaines ;
- l'estimation de la valeur des services écosystémiques et de leur référence spatiale à partir du traitement des données d'utilisation des terres et de l'agrégation de ces valeurs pour chaque province du territoire national ; calcul des changements au cours de cette période.

L'évaluation est donc fondée sur la méthode de *transfert de bénéfices* (ex. Costanza et al., 2006), dans laquelle la valeur des services écosystémiques pour chaque polygone d'utilisation des sols est calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$VSE_{i,k} = A_k \cdot w_i(\text{LC, elevation, dist}) \cdot v_i(\text{LC})$$

où :

$VSE_{i,k}$: valeur (€/an) de l'i-ES du polygone k d'une utilisation spécifique du sol

A_k : superficie du polygone k (ha)

w_i : coefficient [0,1] déterminé pour chaque SE et pour chaque LC spécifique, compte tenu des variables contextuelles (altitude et distance par rapport aux zones urbaines). Pour les perturbations générées par les zones urbaines, seules les zones de plus de 100 ha ont été prises en compte.

v_i : la valeur monétaire des SE pour une LC définie (€/ha)

En particulier, le facteur w_i est défini comme la capacité potentielle d'une LC donnée à offrir une SE spécifique. La plage de valeurs va d'un niveau négligeable (0) à un niveau de pleine capacité (1).

L'étude prend en compte 10 services écosystémiques, qui sont décrits ci-dessous :

- Climate and atmospheric gas regulation : rôle des processus biotiques et abiotiques dans le maintien du cycle chimique et climatique dans l'atmosphère (ex. bilan CO₂/O₂, couche d'ozone, SO_x, niveaux de régulation...).
- Disturbance prevention : fonction tampon et protection contre les perturbations (ex. protection contre les tempêtes, lutte contre les inondations, érosion, etc.).
- Freshwater regulation and supply : débit et régulation des rivières, recharge de l'eau, coûts évités pour la purification de l'eau, approvisionnement en eau (ex. eau potable, irrigation et usage industriel).

- Waste assimilation : fonction tampon et réduction des déchets provenant des activités humaines (par exemple les agents pathogènes tels que *Escherichia coli*) et des nutriments tels que l'azote, le potassium, la filtration des particules de poussière, les composés toxiques de l'air.
- Nutrient regulation : recyclage des nutriments extraits des plantes (agriculture) et des animaux.
- Habitat refugium : mise à disposition de sites appropriés pour l'habitat, l'alimentation, la reproduction, la nidification et le développement d'espèces animales et végétales (directement et indirectement) pour le bien-être de l'homme.
- Recreation : mise à disposition d'espaces de loisirs (chasse, pêche, aviron, vélo...) qui apportent des bénéfices directs (dépenses pour des activités), mais aussi des bénéfices indirects (par exemple la santé de la population).
- Aesthetic and amenity : pour les fonctions esthétiques et spirituelles, la valeur se réfère à la non-utilisation, à la volonté de payer pour le maintien de la qualité et de l'intégrité du site.
- Soil retention and formation : le sol remplit diverses fonctions : filtration et stockage de l'eau, décomposition des déchets organiques. Les systèmes naturels créent et enrichissent le sol et préviennent l'érosion pendant les pluies.
- Pollination : la pollinisation à partir d'animaux pollinisateurs est d'une grande valeur pour les activités humaines, par exemple, 80% des plantes comestibles dépendent des pollinisateurs.

En ce qui concerne les données spatiales, l'étude utilise les données de la cartographie CORINE Land Cover (CLC), le troisième niveau de 1990 et 2000.

Pour l'estimation de la valeur économique des SE potentiels, les classes CLC de troisième niveau ont été regroupées en 6 grandes catégories d'utilisation du sol, conformément aux données disponibles dans la littérature en référence au « marché de substitution », selon ce schéma :

- *Vert urbain*
 - Espaces verts urbains (141)
 - Espaces récréatifs et sportifs (142)
- *Zones agricoles*
 - Terres arables dans les zones non irriguées (211)
 - Terres arables dans les zones irriguées (212)
 - Rizières (213)
 - Vignes (221)
 - Vergers (222)
 - Cultures annuelles associées à cultures permanentes (241)
 - Systèmes de culture complexes et parcelles (242)
 - Prairies stables (231)
- *Pâturages*
 - Superficies occupées principalement par des cultures agricoles avec des zones naturelles importantes (243)
 - Pâturages naturels et prairies d'altitude (321)
 - Terres de bruyères et buissons (322)
- *Forêts*
 - Zones de végétation scérophyllie (323)

- Végétation en évolution (324)
- Zones agroforestières (244)
- Bois feuillus (311)
- Bois de conifères (312)
- Bois mixtes de conifères et feuillus (313)
- *Zones humides*
 - Marais intérieurs (411)
 - Tourbières (412)
- *Eaux*
 - Cours d'eau (511)
 - Bassins d'eau (512)

La revue de la littérature économique, en utilisant la méthode du marché de subrogation, a permis de collecter les valeurs monétaires par SE fournis par chaque couverture terrestre (LC), exprimées en euros par hectare d'utilisation du sol.

Le tableau 8.2 ci-dessous montre la valeur monétaire (€/ha par an) des services écosystémiques pour chaque classe d'utilisation des terres.

Les cellules vides indiquent qu'au moment de l'étude, aucune valeur économique consolidée pour ces SE spécifiques n'était disponible dans la littérature analysée.

SE	Valeur des services écosystémiques (€/ha par an)					
	Zones agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux
Climate and atmospheric gas regulation	23,00	7,50	124,00	623,30	232,00	-
Disturbance prevention	-	-	163,00	-	6.346,00	-
Freshwater regulation and supply	58,00	3,00	3.988,00	10,00	4.047,50	640,00
Waste assimilation	-	76,00	76,00	-	1.454,00	583,00
Nutrient regulation	145,00	-	317,00	-	212,00	-
Habitat refugium and biodiversity	1.548,00	-	629,33	-	80,37	-
Recreation	27,90	2,00	107,46	4.609,00	1.310,00	685,00
Aesthetic and amenity	31,45	1,00	1,51	-	3.484,00	129,00
Soil retention and formation	3,97	5,00	9,05	-	-	1.067,00
Pollination	30,62	24,00	301,66	-	-	-

TABLEAU 8.2. VALEURS MONÉTAIRES DE SE POUR CHAQUE CATÉGORIE D'UTILISATION DES TERRES (SCOLOZZI ET AL., 2012)

8.2.2 DÉTERMINATION DE LA BASE DE RÉFÉRENCE POUR L'ÉVALUATION DES SE DANS LA ZONE DE PINEROLO

Dans le cadre du projet ARTACLIM, cette méthodologie a été reproduite dans l'étude de cas italienne de la zone homogène de Pinerolo (45 municipalités) afin d'évaluer les effets intersectoriels des impacts générés par le changement climatique. De cette manière, il est possible d'exprimer une évaluation économique à la fois des services écosystémiques actuels et de leur variation à la suite des impacts générés par le changement climatique.

Pour l'évaluation de la base de référence des SE, l'utilisation de données provenant de différentes sources a été testée afin de comparer les résultats finaux.

En particulier, pour l'analyse de l'utilisation des terres, qui est à la base de la méthodologie proposée par l'étude citée, les données dérivent de :

- Corine Land Cover Nazionale de 2000 (CLC 2000)⁴, avec des détails au troisième niveau ;
- Corine Land Cover National 2012 (CLC 2012)⁵, avec des détails au troisième niveau ;
- Corine Land Cover Piemonte de 2010 (CLP 2010)⁶, avec des détails au troisième niveau ;
- Plans forestiers territoriaux de 2000 (PFT 2000)⁷, suite à l'établissement d'une correspondance entre les catégories d'utilisation des terres et les classes CLC.

Le tableau 8.3 ci-dessous montre les catégories d'utilisation des sols présentes dans la zone homogène de Pinerolo, agrégées par macrocatégories.

Macrocatégories	CLC 2000 (ha)	CLC 2012 (ha)	PFT 2000 (ha)	CLP 2010 (ha)
Eaux	655,41	488,97	780,06	1.593,77
Zones agricoles	32.517,50	32.612,86	30.915,12	31.835,89
Forêts	56.866,72	58.505,86	56.341,42	44.847,45
Pâturages	24.579,82	28.401,09	29.003,10	37.278,53
Vert urbain	-	-	171,78	1.239,85
Zones autres	15.604,39	10.215,05	13.256,63	13.395,35
Total complessif	130.223,83	130.223,83	130.468,11	130.190,83

TABLEAU 8.3. CATÉGORIES D'UTILISATION DES SOLS PRÉSENTES DANS LA ZONE HOMOGENÈ DE PINEROLO

Si l'on considère que la zone homogène de Pinerolo couvre une superficie de 130.223,83 ha, il ressort immédiatement du tableau ci-dessus que la superficie totale d'utilisation des terres provenant des PFT 2000 et CLP 2010 diffère de la superficie totale de la zone.

⁴ Source : <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/corine-land-cover>

⁵ Source : <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/sia-ispra/download-mais/corine-land-cover>

⁶ Source : <http://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

⁷ Source : Système Régional d'Information Forestière (SIFOR). Les Plans Forestiers Territoriaux sont traditionnellement considérés comme étant mis à jour jusqu'à 2000.

Cette différence est due au chevauchement imparfait entre les limites des polygones d'utilisation des terres des PFT 2000 et CLP 2010 et les limites administratives⁸ des municipalités de la zone de Pinerolo.

De plus, il convient de noter que dans le CLC national, l'utilisation du sol "vert urbain" n'est pas présente, en raison de l'échelle moins détaillée par rapport aux PFT 2000 et CLP 2010.

Comme mentionné dans le commentaire sur la méthodologie de référence, certains SE ont une pertinence différente selon la gamme d'altitude ou la distance par rapport aux centres urbains où se trouve la LC qui les génère.

Afin d'évaluer les différents poids des SE par rapport à ces variables, les bandes altimétriques ont été développées dans l'environnement G.I.S. à partir du *Modèle Numérique de Terrain* (MNT)⁹.

En outre, une zone tampon de distance a été générée à partir des zones bâties, en ne considérant que les zones bâties de plus de 100 ha, en tenant compte de la superficie du bâtiment continu représenté dans les *Chartes Techniques Régionales* (C.T.R.).

Enfin, grâce à l'utilisation d'outils G.I.S., les données relatives aux bandes altimétriques et aux tampons de distance des centres habités ont été appariés à chaque polygone LC. En particulier, selon la méthodologie de Scolozzi et al. les SE dont l'importance dépend de la distance des centres habités s'étendant sur plus de 100 ha sont :

- Habitat refugium and biodiversity
- Disturbance prevention
- Waste assimilation
- Recreation
- Pollination

Le seul SE « *Climate and atmospheric gas regulation* » dépend de la zone altimétrique de la CL génératrice.

Les autres SE ne sont pas affectés par la hauteur de la rivière ni par la distance aux centres habités.

En appliquant les valeurs monétaires¹⁰ et les facteurs w_i ¹¹ aux différents polygones d'utilisation des sols, on obtient les valeurs globales suivantes pour les services écosystémiques offerts par la zone homogène de Pinerolo :

Services écosystémiques	PFT (€/an)	2000 CLC (€/an)	2000 CLC (€/an)	2012 CLP (€/an)	2010
Climate and atmospheric gas regulation	6.614.926,06	6.637.115,41	6.759.072,10	6.266.795,33	
Disturbance prevention	7.640.301,09	7.682.097,94	7.759.927,93	6.149.965,93	

⁸ Source : <http://www.geoportale.piemonte.it/cms>

⁹ Source : <http://www.geoportale.piemonte.it/cms/>

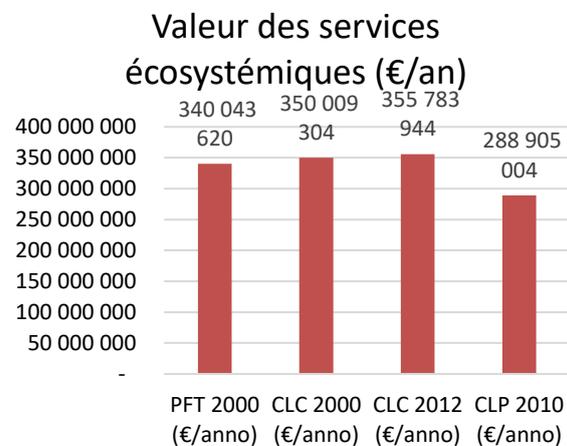
¹⁰ Voir tableau 8.2- Valeurs monétaires des SE pour chaque classe d'utilisation des sols (Scolozzi et al., 2012)

¹¹ Un facteur w_i est le potentiel d'un LC donné à offrir un SE spécifique, allant d'un niveau négligeable (0) à un niveau de pleine capacité (1), en tenant compte des variables contextuelles (altitude et distance par rapport aux zones urbaines).

Voir le tableau 8.2 - Valeurs monétaires de l'ES pour chaque classe d'utilisation des sols (Scolozzi et al., 2012).

Freshwater regulation and supply	220.548.500,30	222.651.324,97	225.896.925,22	177.282.379,95
Waste assimilation	5.030.048,59	4.777.183,27	4.897.102,82	5.151.020,31
Nutrient regulation	21.122.799,75	21.760.855,84	22.400.161,79	17.907.513,28
Habitat refugium	52.286.003,03	60.193.223,38	61.382.225,55	48.653.890,26
Recreation	6.623.179,48	5.991.964,45	5.944.063,20	9.715.954,71
Aesthetic and amenity	635.474,64	761.084,82	738.076,59	744.247,17
Soil retention and formation	1.607.557,04	1.463.705,38	1.320.761,80	2.414.895,97
Pollination	17.934.830,29	18.090.748,95	18.685.626,78	14.618.341,37
Total (€/an)	340.043.620	350.009.304	355.783.944	288.905.004

La valeur totale des SE offerts par la zone homogène de Pinerolo varie donc de 288.905.004 €/an (CLP 2010) à 355.783.944 €/an (CLC 2012) en fonction de la source de données utilisée pour le calcul.



En évaluant l'incidence des services écosystémiques individuels sur la valeur totale, nous avons la situation suivante :

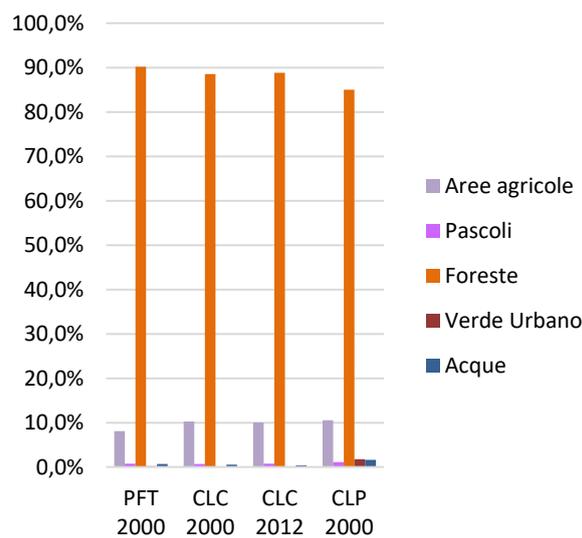
Services écosystémiques	PFT 2000	CLC 2000	CLC 2012	CLP 2010
Climate and atmospheric gas regulation	1,9%	1,9%	1,9%	2,2%
Disturbance prevention	2,2%	2,2%	2,2%	2,1%
Freshwater regulation and supply	64,9%	63,6%	63,5%	61,4%
Waste assimilation	1,5%	1,4%	1,4%	1,8%
Nutrient regulation	6,2%	6,2%	6,3%	6,2%
Habitat refugium	15,4%	17,2%	17,3%	16,8%
Recreation	1,9%	1,7%	1,7%	3,4%
Aesthetic and amenity	0,2%	0,2%	0,2%	0,3%

Soil retention and formation	0,5%	0,4%	0,4%	0,8%
Pollination	5,3%	5,2%	5,3%	5,1%

d'où il ressort que, quelle que soit la source de données utilisée, le SE « Régulation et approvisionnement en eau douce » (*Freshwater regulation and supply*) est le plus significatif.

Enfin, si l'on examine la pertinence des écosystèmes individuels dans la fourniture de SE, la charge la plus lourde (environ 90 %) pèse sur l'écosystème forestier, comme le montre le graphique ci-dessous.

Pertinence del l'ecosystème



8.2.3 ANALYSE DE LA METHODOLOGIE APPLIQUÉE POUR L'ÉVALUATION DES SE

L'analyse de la méthodologie appliquée pour l'évaluation des SE révèle quelques points critiques :

1. Aucun SE d'approvisionnement n'est pris en compte ;
2. Les SE fournis par les pâturages sont sous-estimés car les valeurs monétaires sont attribuées par de très petites unités de surface, en particulier par rapport au SE « *Recreation* » ;
3. L'analyse de la couverture terrestre avec le CLC national n'est pas suffisamment détaillée à l'échelle locale, comme dans le cas de la zone homogène de Pinerolo. En effet, dans l'analyse du CLC, les écosystèmes liés à l'eau (milieux humides et eaux courantes) sont nettement sous-estimés, et la macro-catégorie "vert urbain" est totalement absente.

Il est intéressant de comparer la valeur des SE fournies par la Province de Turin et obtenues à partir de l'étude Scolozzi et al. (2012) avec la valeur des SE fournies par la zone homogène de Pinerolo, en utilisant le CLC 2000 comme source homogène de données.

La valeur totale des SE fournies par la province de Turin en 2000 se situe entre 1 500 et 2 000 millions d'euros, tandis que la zone homogène de Pinerolo atteint une valeur totale d'environ 350 millions d'euros la même année, ce qui représente entre 17,5 % et 23,3 % de la valeur de l'ensemble de la province.

En termes de territoire, la zone homogène de Pinerolo (130 223 ha) représente environ 19% de l'ensemble de la province (682 700 ha), de sorte que l'on peut dire que le territoire de Pinerolo fournit des SE proportionnellement à l'étendue de son territoire.

Les tableaux suivants sont utilisés pour calculer la valeur des SE à partir des quatre différentes sources d'utilisation des sols.

Tableaux pour le calcul de la valeur des services écosystémiques
Land Cover Piemonte (CLP) – 2010

SE	Valeur monétaire des services écosystémiques (€/ha par an)						Valeur des SE (€/an)						
	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	
Climate and atmospheric gas regulation	23,00 €	7,50 €	124,00 €	623,30 €	232,00 €	- €	463.665,27 €	183.514,71 €	4.862.625,29 €	756.990,05 €	- €	- €	6.266.795,33 €
Disturbance prevention	- €	- €	163,00 €	- €	6.346,00 €	- €	- €	- €	6.149.965,93 €	- €	- €	- €	6.149.965,93 €
Freshwater regulation and supply	58,00 €	3,00 €	3.988,00 €	10,00 €	4.047,50 €	640,00 €	1.098.656,35 €	98.070,96 €	175.056.235,36 €	11.094,91 €	- €	1.018.322,37 €	177.282.379,95 €
Waste assimilation	- €	76,00 €	76,00 €	- €	1.454,00 €	583,00 €	- €	1.823.134,87 €	2.578.817,54 €	- €	- €	749.067,91 €	5.151.020,31 €
Nutrient regulation	145,00 €	- €	317,00 €	- €	212,00 €	- €	4.311.956,67 €	- €	13.595.556,61 €	- €	- €	- €	17.907.513,28 €
Habitat refugium	1.548,00 €	- €	629,33 €	- €	80,37 €	- €	22.683.211,59 €	- €	25.970.678,67 €	- €	- €	- €	48.653.890,26 €
Recreation	27,90 €	2,00 €	107,46 €	4.609,00 €	1.310,00 €	685,00 €	441.866,93 €	51.008,09 €	4.040.522,73 €	4.228.309,88 €	- €	954.247,08 €	9.715.954,71 €
Aesthetic and amenity	31,45 €	1,00 €	1,51 €	- €	3.484,00 €	129,00 €	441.178,94 €	31.593,84 €	66.218,79 €	- €	- €	205.255,60 €	744.247,17 €
Soil retention and formation	3,97 €	5,00 €	9,05 €	- €	- €	1.067,00 €	125.327,52 €	186.163,17 €	405.670,97 €	- €	- €	1.697.734,32 €	2.414.895,97 €
Pollination	30,62 €	24,00 €	301,66 €	- €	- €	- €	841.909,55 €	878.241,06 €	12.898.190,76 €	- €	- €	- €	14.618.341,37 €
							30.407.772,82 €	3.251.726,70 €	245.624.482,64 €	4.996.394,84 €	- €	4.624.627,28 €	288.905.004,28 €

Superficie des écosystèmes pondérée par le facteur w_i (ha)

	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux
Climate and atmospheric gas regulation	20.159,36	24.468,63	39.214,72	1.214,49	-	1.593,77
Disturbance prevention	31.568,64	37.232,63	37.729,85	1.120,05	-	1.591,13
Freshwater regulation and supply	18.942,35	32.690,32	43.895,75	1.109,49	-	1.591,13
Waste assimilation	31.568,64	23.988,62	33.931,81	1.120,05	-	1.284,85
Nutrient regulation	29.737,63	37.232,63	42.888,19	1.120,05	-	1.591,13
Habitat refugium	14.653,24	37.232,63	41.267,19	1.120,05	-	1.505,19
Recreation	15.837,52	25.504,05	37.600,25	917,40	-	1.393,06
Aesthetic and amenity	14.027,95	31.593,84	43.853,51	1.120,05	-	1.591,13
Soil retention and formation	31.568,64	37.232,63	44.825,52	1.120,05	-	1.591,13
Pollination	27.495,41	36.593,38	42.757,38	1.120,05	-	1.591,13

Corine Land Cover (CLC) - 2000

SE	Valeur monétaire des services écosystémiques (€/ha par an)						Valeur des SE (€/an)						
	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	
Climate and atmospheric gas regulation	23,00 €	7,50 €	124,00 €	623,30 €	232,00 €	- €	511.796,43 €	151.479,02 €	5.973.839,96 €	- €	- €	- €	6.637.115,41 €
Disturbance prevention	- €	- €	163,00 €	- €	6.346,00 €	- €	- €	- €	7.682.097,94 €	- €	- €	- €	7.682.097,94 €
Freshwater regulation and supply	58,00 €	3,00 €	3.988,00 €	10,00 €	4.047,50 €	640,00 €	1.220.589,92 €	67.928,27 €	220.943.347,25 €	- €	- €	419.459,52 €	222.651.324,97 €
Waste assimilation	- €	76,00 €	76,00 €	- €	1.454,00 €	583,00 €	- €	1.317.197,74 €	3.115.966,94 €	- €	- €	344.018,58 €	4.777.183,27 €
Nutrient regulation	145,00 €	- €	317,00 €	- €	212,00 €	- €	4.402.881,32 €	- €	17.357.974,52 €	- €	- €	- €	21.760.855,84 €
Habitat refugium	1.548,00 €	- €	629,33 €	- €	80,37 €	- €	27.604.897,78 €	- €	32.588.325,60 €	- €	- €	- €	60.193.223,38 €
Recreation	27,90 €	2,00 €	107,46 €	4.609,00 €	1.310,00 €	685,00 €	505.633,76 €	38.179,09 €	5.043.944,51 €	- €	- €	404.207,08 €	5.991.964,45 €
Aesthetic and amenity	31,45 €	1,00 €	1,51 €	- €	3.484,00 €	129,00 €	570.507,43 €	23.974,73 €	82.055,36 €	- €	- €	84.547,31 €	761.084,82 €
Soil retention and formation	3,97 €	5,00 €	9,05 €	- €	- €	1.067,00 €	127.956,23 €	122.105,32 €	514.326,16 €	- €	- €	699.317,68 €	1.463.705,38 €
Pollination	30,62 €	24,00 €	301,66 €	- €	- €	- €	909.891,51 €	558.491,94 €	16.622.365,50 €	- €	- €	- €	18.090.748,95 €
							35.854.154,38 €	2.279.356,11 €	309.924.243,73 €	- €	- €	1.951.550,18 €	350.009.304,40 €

Superficie des écosystèmes pondérée par le facteur w_i (ha)

	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux
Climate and atmospheric gas regulation	22.252,02	20.197,20	48.176,13			655,41
Disturbance prevention	32.230,79	24.421,06	47.129,44			655,41
Freshwater regulation and supply	21.044,65	22.642,76	55.402,04			655,41
Waste assimilation	32.230,79	17.331,55	40.999,56			590,08
Nutrient regulation	30.364,70	24.421,06	54.757,02			655,41
Habitat refugium	17.832,62	24.421,06	51.782,57			616,94
Recreation	18.123,07	19.089,54	46.937,88			590,08
Aesthetic and amenity	18.140,14	23.974,73	54.341,30			655,41
Soil retention and formation	32.230,79	24.421,06	56.831,62			655,41
Pollination	29.715,59	23.270,50	55.102,98			655,41

Corine Land Cover (CLC) – 2012

SE	Valeur monétaire des services écosystémiques (€/ha par an)						Valeur des SE (€/an)						
	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	
Climate and atmospheric gas regulation	23,00 €	7,50 €	124,00 €	623,30 €	232,00 €	- €	509.875,99 €	172.590,11 €	6.076.606,01 €	- €	- €	- €	6.759.072,10 €
Disturbance prevention	- €	- €	163,00 €	- €	6.346,00 €	- €	- €	- €	7.759.927,93 €	- €	- €	- €	7.759.927,93 €
Freshwater regulation and supply	58,00 €	3,00 €	3.988,00 €	10,00 €	4.047,50 €	640,00 €	1.222.190,72 €	79.654,71 €	224.282.141,13 €	- €	- €	312.938,68 €	225.896.925,22 €
Waste assimilation	- €	76,00 €	76,00 €	- €	1.454,00 €	583,00 €	- €	1.497.927,32 €	3.151.298,81 €	- €	- €	247.876,69 €	4.897.102,82 €
Nutrient regulation	145,00 €	- €	317,00 €	- €	212,00 €	- €	4.442.697,38 €	- €	17.957.464,41 €	- €	- €	- €	22.400.161,79 €
Habitat refugium	1.548,00 €	- €	629,33 €	- €	80,37 €	- €	27.468.067,24 €	- €	33.914.158,31 €	- €	- €	- €	61.382.225,55 €
Recreation	27,90 €	2,00 €	107,46 €	4.609,00 €	1.310,00 €	685,00 €	506.770,86 €	44.467,07 €	5.101.580,80 €	- €	- €	291.244,48 €	5.944.063,20 €
Aesthetic and amenity	31,45 €	1,00 €	1,51 €	- €	3.484,00 €	129,00 €	564.979,98 €	27.870,23 €	82.149,68 €	- €	- €	63.076,70 €	738.076,59 €
Soil retention and formation	3,97 €	5,00 €	9,05 €	- €	- €	1.067,00 €	128.589,61 €	141.262,35 €	529.182,40 €	- €	- €	521.727,45 €	1.320.761,80 €
Pollination	30,62 €	24,00 €	301,66 €	- €	- €	- €	914.023,54 €	651.433,85 €	17.120.169,39 €	- €	- €	- €	18.685.626,78 €
							35.757.195,31 €	2.615.205,63 €	315.974.678,86 €	- €	- €	1.436.863,99 €	355.783.943,78 €

Superficie des écosystèmes pondérée par le facteur w_i (ha)

	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux
Climate and atmospheric gas regulation	22.168,52	23.012,01	49.004,89			488,97
Disturbance prevention	32.390,33	28.252,47	47.606,92			488,97
Freshwater regulation and supply	21.072,25	26.551,57	56.239,25			488,97
Waste assimilation	32.390,33	19.709,57	41.464,46			425,17
Nutrient regulation	30.639,29	28.252,47	56.648,15			488,97
Habitat refugium	17.744,23	28.252,47	53.889,31			477,58
Recreation	18.163,83	22.233,54	47.474,23			425,17
Aesthetic and amenity	17.964,39	27.870,23	54.403,76			488,97
Soil retention and formation	32.390,33	28.252,47	58.473,19			488,97
Pollination	29.850,54	27.143,08	56.753,20			488,97

Plans Forestiers Territoriaux (PFT) - 2000

SE	Valeur monétaire des services écosystémiques (€/ha par an)						Valeur des SE (€/an)						
	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux	
Climate and atmospheric gas regulation	23,00 €	7,50 €	124,00 €	623,30 €	232,00 €	- €	442.829,80 €	165.539,93 €	5.900.362,08 €	106.194,25 €	- €	- €	6.614.926,06 €
Disturbance prevention	- €	- €	163,00 €	- €	6.346,00 €	- €	- €	- €	7.640.301,09 €	- €	- €	- €	7.640.301,09 €
Freshwater regulation and supply	58,00 €	3,00 €	3.988,00 €	10,00 €	4.047,50 €	640,00 €	1.064.497,71 €	82.802,79 €	218.900.613,38 €	1.613,75 €	- €	498.972,67 €	220.548.500,30 €
Waste assimilation	- €	76,00 €	76,00 €	- €	1.454,00 €	583,00 €	- €	1.471.304,19 €	3.175.756,16 €	- €	- €	382.988,23 €	5.030.048,59 €
Nutrient regulation	145,00 €	- €	317,00 €	- €	212,00 €	- €	4.235.314,10 €	- €	16.887.485,65 €	- €	- €	- €	21.122.799,75 €
Habitat refugium	1.548,00 €	- €	629,33 €	- €	80,37 €	- €	20.074.673,97 €	- €	32.211.329,07 €	- €	- €	- €	52.286.003,03 €
Recreation	27,90 €	2,00 €	107,46 €	4.609,00 €	1.310,00 €	685,00 €	459.079,54 €	44.262,07 €	5.021.663,12 €	626.106,08 €	- €	472.068,67 €	6.623.179,48 €
Aesthetic and amenity	31,45 €	1,00 €	1,51 €	- €	3.484,00 €	129,00 €	424.851,33 €	27.265,44 €	82.783,69 €	- €	- €	100.574,18 €	635.474,64 €
Soil retention and formation	3,97 €	5,00 €	9,05 €	- €	- €	1.067,00 €	121.438,39 €	144.714,37 €	509.523,30 €	- €	- €	831.880,99 €	1.607.557,04 €
Pollination	30,62 €	24,00 €	301,66 €	- €	- €	- €	821.845,00 €	676.704,54 €	16.436.280,75 €	- €	- €	- €	17.934.830,29 €
							27.644.529,83 €	2.612.593,33 €	306.766.098,28 €	733.914,08 €	- €	2.286.484,74 €	340.043.620,27 €

Superficie des écosystèmes pondérée par le facteur w_i (ha)

	Zones Agricoles	Pâturages	Forêts	Vert Urbain	Zones humides	Eaux
Climate and atmospheric gas regulation	19.253,47	22.071,99	47.583,57	170,37	-	780,06
Disturbance prevention	30.589,01	28.942,87	46.873,01	161,38	-	779,64
Freshwater regulation and supply	18.353,41	27.600,93	54.889,82	161,38	-	779,64
Waste assimilation	30.589,01	19.359,27	41.786,27	161,38	-	656,93
Nutrient regulation	29.209,06	28.942,87	53.272,83	161,38	-	779,64
Habitat refugium	12.968,14	28.942,87	51.183,53	161,38	-	734,23
Recreation	16.454,46	22.131,03	46.730,53	135,84	-	689,15
Aesthetic and amenity	13.508,79	27.265,44	54.823,64	161,38	-	779,64
Soil retention and formation	30.589,01	28.942,87	56.300,92	161,38	-	779,64
Pollination	26.840,14	28.196,02	54.486,11	161,38	-	779,64

9 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA COMMUNAUTÉ DE COMMUNES DU HAUT-CHABLAIS

9.1 INTRODUCTION

9.1.1 CONTEXTE

Cette partie propose un état des lieux de la situation dans le Haut-Chablais, un des trois territoires partenaires du projet avec le PNR des Bauges et la Zone homogène du Pignerol.

Si la Communauté de Communes du Haut Chablais (CCHC) s'est engagée dans ce projet Interreg Alcotra, c'est que les effets du changement climatique constituent une problématique pour ce territoire de moyenne montagne. En témoigne une réflexion, réalisée par la CCHC et RAEE en 2015 sur la chaîne d'impacts associés au changement climatique sur le territoire (voir la figure 1).

Cette première approche permet de mettre en évidence 1) quels sont les effets du changement climatique qui apparaissent comme marquants pour le territoire, 2) quels sont les impacts possibles sur les ressources et 3) les impacts sur les hommes et leurs activités et enfin 4) comment tout cela intervient dans le contexte territorial particulier de la CCHC.

Les effets les plus craints sont d'une part l'augmentation des températures et ses possibles répercussions sur les conditions estivales et sur l'enneigement, et d'autre part la modification des régimes de précipitations et sa traduction en termes de crues ou de sécheresse (et potentiellement d'incendies). Ils interviennent sur un territoire marqué par le vieillissement de sa population, une forme de déprise rurale au profit des espaces urbains, une forte dépendance aux énergies fossiles et une augmentation du prix de l'énergie mais aussi un développement d'énergies renouvelables et une relocalisation et diversification des activités économiques.

Les impacts sur les ressources concernent principalement l'eau (approvisionnement pour certaines communes et gestion de la ressource plus généralement) et la biodiversité (modification et diminution potentielle). Les effets sur les hommes et leurs activités portent sur la santé (propagation de virus, qualité de l'air), l'urbanisme et l'aménagement (impact sur les routes, sur les bâtis notamment anciens), le tourisme (modification de l'activité du fait de l'évolution de l'enneigement, problème de sécurité, évolution des périodes touristiques), l'agriculture et l'élevage (développement de parasites et maladies, évolution de la biodiversité et effets induits sur les productions soumises à labels), l'industrie forestière (altération de la qualité).

Sur la base de ce premier constat, la CCHC souhaite approfondir certains des points relevés ici, les spécifier et identifier les formes d'adaptation possibles au travers des outils de planification à sa disposition. Afin de les accompagner au mieux dans cette dynamique, ce rapport propose un état des lieux de la situation en abordant 1) les effets plus précis du changement climatique sur le territoire, 2) les enjeux du territoire sur cette question et 3) les outils de planification existant et leur adaptabilité à la problématique du changement climatique.

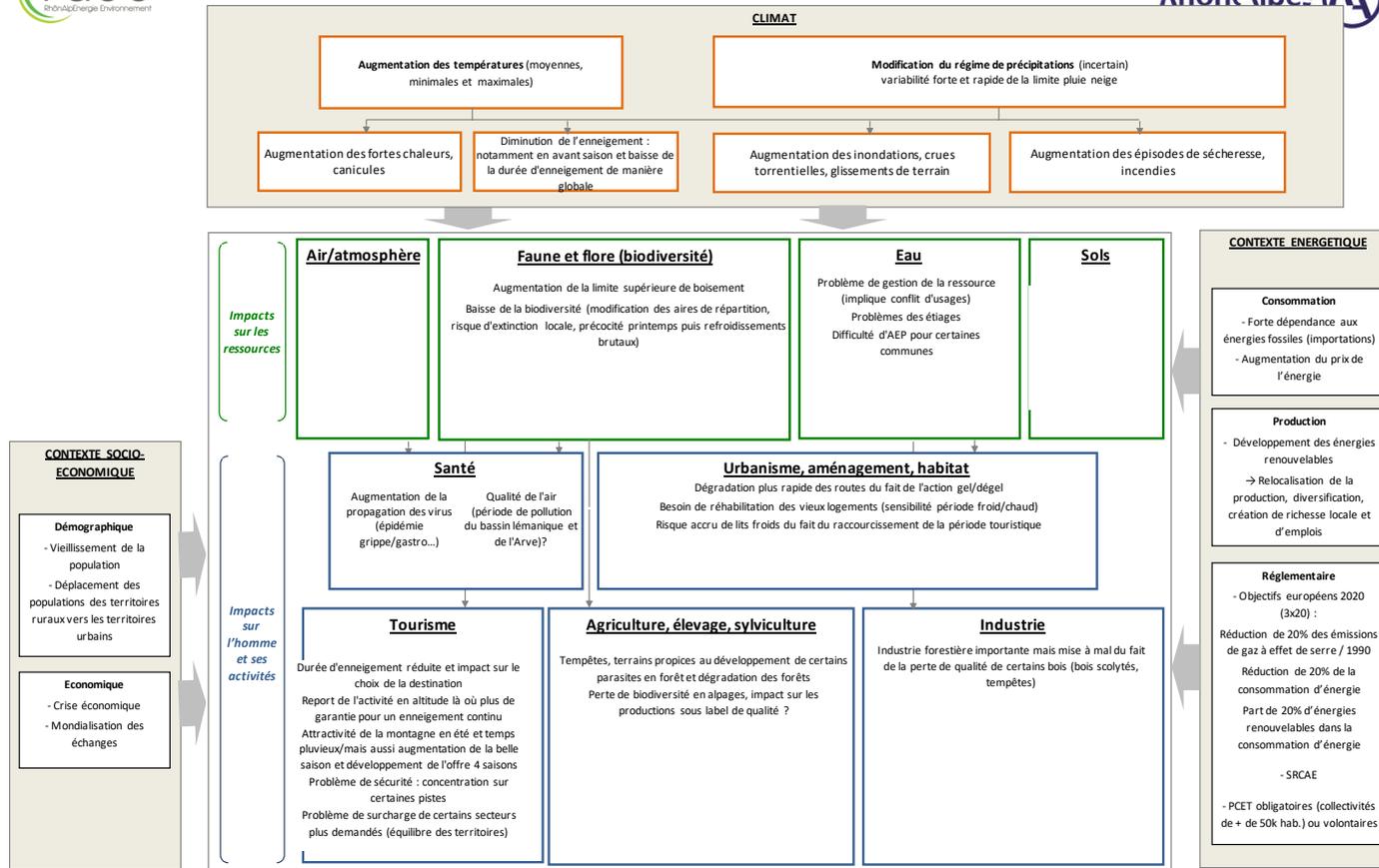


FIGURE 1 : SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE CCHC – RAEÉ SUR LA CHAÎNE D'IMPACTS ASSOCIÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE DE LA CCHC (RAEE & CCHC, 2015)

9.1.2 MÉTHODE

Pour faire cet état des lieux, un croisement de la littérature scientifique, de la littérature grise et des ressentis des acteurs du territoire a été réalisé.

La revue de littérature a été réalisée en ciblant les études et articles portant sur les impacts du changement climatique sur le territoire du Haut Chablais spécifiquement et sur des espaces voisins ou comparables.

En ce qui concerne les ressentis des acteurs, une quinzaine d'entretiens semi-directifs ont été organisés durant l'hiver 2017-2018.

Le guide d'entretien reposait sur les éléments suivants :

- Le changement climatique aujourd'hui : les ressentis et les impacts
- L'adaptation : quelles actions déjà mises en œuvre aujourd'hui ?
- La perception de l'évolution du changement climatique demain ?
- Les déterminants / forces sur le territoire
- Les attentes en termes d'outillage

Afin de recueillir une diversité de points de vue, nous avons cherché à rencontrer des personnes aux enjeux et problématiques différentes :

- 2 agriculteurs
- 1 botaniste
- 2 Bureaux d'études impliqués sur le territoire de la CCHC
- 1 élu et 1 chargé de mission du SIAC
- 2 chargés de mission de la CCHC
- 2 accompagnateurs de montagne / moniteur de ski
- 1 association environnementale
- 1 association de commerçants
- 2 chargés de mission ONF
- 1 chargé de mission fédération de chasse
- 1 responsable de remontées mécaniques

Nous avons également intégré les échanges issus de trois réunions avec les élus de la CCHC : deux avec le bureau (les 8 décembre 2017 et 9 février 2018) et une avec le conseil des maires (donner la date).

D'autres personnes ont été contactées mais n'ont pas répondu à l'invitation ou n'ont pas souhaité nous rencontrer :

- 1 élu
- 1 responsable de domaine skiable
- 2 responsables de remontées mécaniques
- 1 représentant d'EDF

9.2 LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE HAUT-CHABLAIS

Comme on le voit dans l'étude préalable réalisée par la CCHC et RAEE, les effets du changement climatique sont déjà perçus sur le territoire. Pour compléter cette première analyse, l'idée de cette première partie est de croiser les ressentis des acteurs rencontrés avec les données disponibles.

En terme d'observations climatiques, nous n'avons pas connaissance de données spécifiques à l'échelle du Haut-Chablais, nous utiliserons donc pour cela des données issues du travail de l'ORECC sur le territoire de la Communauté d'Agglomération de Thonon et de la Communauté de Communes Pays d'Évian - Vallée d'Abondance (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a, 2018b). Malheureusement, les données de la station des Gets (altitude 1 100m, exposition Nord-Ouest), dont l'historique remonte à 1988, sont insuffisantes pour réaliser une analyse de tendance climatique (nécessité de comparer deux périodes de 30 ans) (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2017)

En ce qui concerne les projections, nous nous basons sur les travaux réalisés par le Centre d'Étude de la Neige dans le cadre du projet Adamont sur l'enneigement à moyenne altitude (1500m). Celles-ci ont été produites à partir de réanalyses et d'observations réalisées entre 1958 et 2016 et en utilisant les scénarios établis par le GIEC (Verfaillie et al., 2017).

9.2.1 UN RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Un des effets principaux du changement climatique est la hausse globale des températures.

Comme le montre le graphique ci-contre, on observe **une augmentation des températures moyennes annuelles de +1,4°C à Thonon INRA entre 1951 et 2016** (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a).

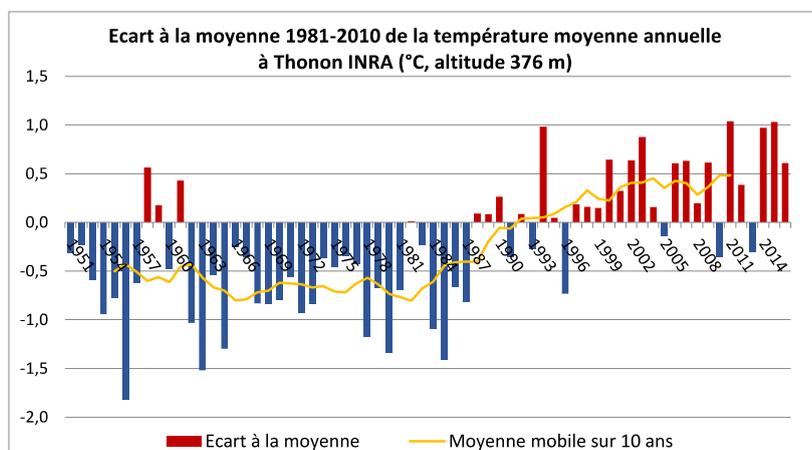


FIGURE 2 : ÉCART À LA MOYENNE 1981-2010 DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE ANNUELLE À THONON INRA (°C, ALTITUDE 376 M)

Les variations interannuelles de la température sont importantes et vont le demeurer dans les prochaines décennies. Néanmoins, les projections sur le long terme en Auvergne-Rhône-Alpes annoncent une poursuite de la tendance déjà observée de réchauffement jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, l'évolution de la température moyenne annuelle diffère selon le scénario d'évolution des émissions de gaz à effet de serre considéré. Le seul qui stabilise l'augmentation des températures est le scénario RCP2.6 (politique climatique visant à faire baisser les concentrations en CO₂). Selon le RCP8.5 (scénario sans politique climatique), le réchauffement pourrait dépasser +4°C à l'horizon 2071-2100 (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a).

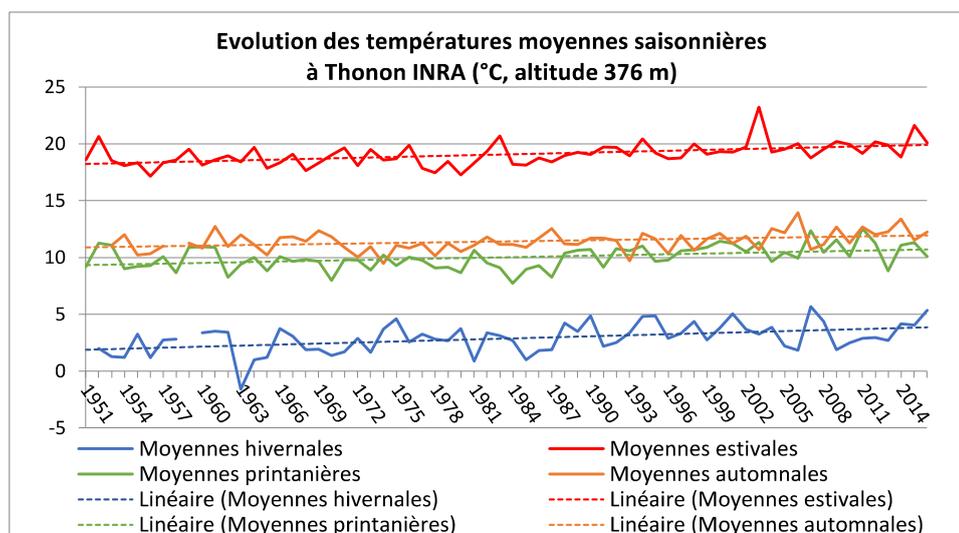
9.2.2 UN RÉCHAUFFEMENT PLUS MARQUÉ EN HIVER

D'après les relevés de température effectués à Thonon, la hausse des températures est plus importantes en hiver : +1,9°C et en été : +1,7°C (cf. Figure 3) (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a).

Hiver	+1,9°C
Printemps	+1,5°C
Été	+1,7°C
Automne	+1,0°C
Moyenne annuelle	+1,4°C

TABLEAU 1 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES À THONON INRA (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018A)

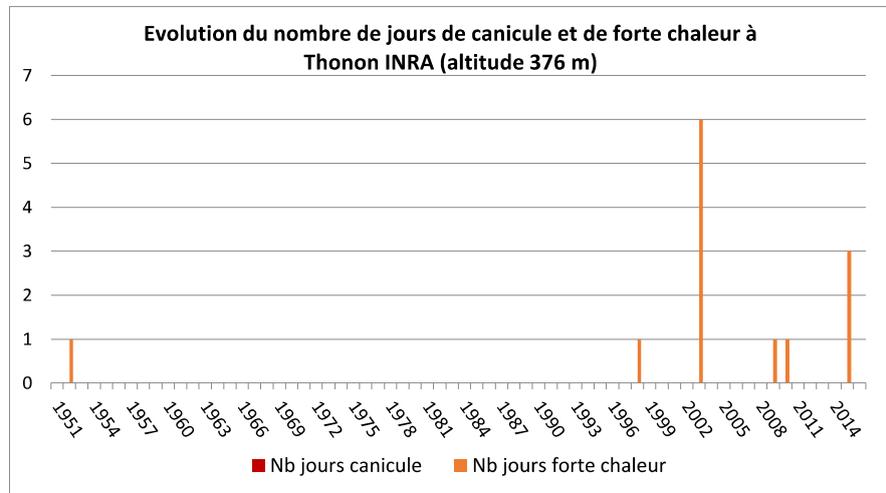
FIGURE 3 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES SAISONNIÈRES À THONON INRA (°C, ALTITUDE 376 M)



En ce qui concerne l'été, la Figure 4 ci-dessous montre une croissance du nombre de jours de forte chaleur ¹².

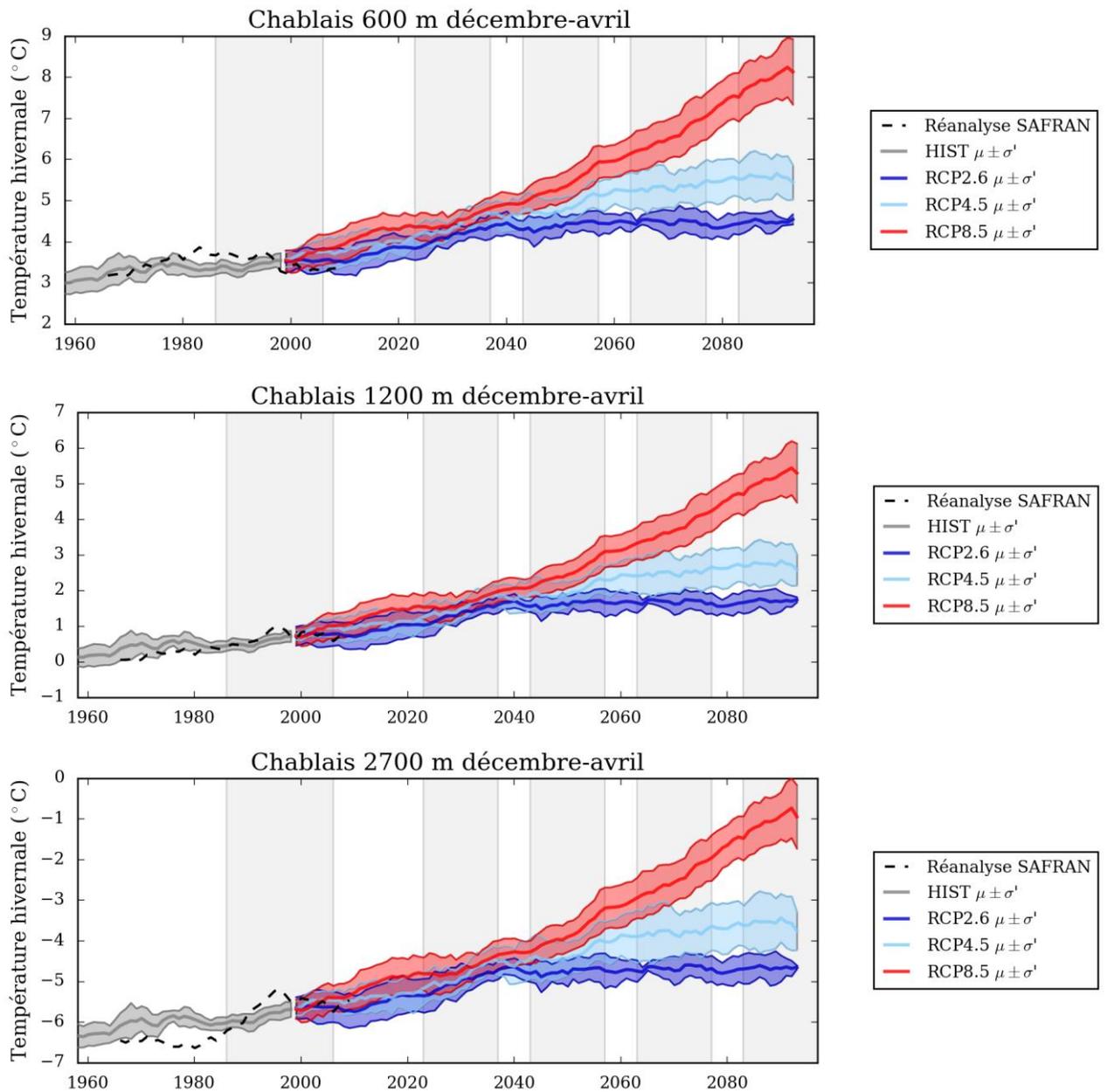
¹² La notion de forte chaleur est définie à partir de seuils de températures minimales et maximales, atteintes ou dépassées simultanément un jour donné. Une canicule correspond à une succession d'au moins 3 jours consécutifs de fortes chaleurs. Le troisième jour est alors compté comme le premier jour de canicule. Les seuils de température permettant de définir fortes chaleurs et canicules ont été choisis sur la base d'un travail conjoint entre Météo France et l'Institut National de Veille Sanitaire, en fonction de critères de santé publique. Ils correspondent aux seuils à partir desquels on a pu observer une surmortalité journalière supérieure de 50 à 100 %, par rapport à la moyenne glissante sur 3 ans de la mortalité pour la même journée, pour 14 agglomérations françaises. Pour la Haute-Savoie, les valeurs retenues sont les suivantes : température min de 19°, température max de 34° (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a)

FIGURE 4 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE JOURS DE CANICULE ET FORTE CHALEUR¹³ À THONON INRA (1951-2016 – ALTITUDE 376 M)



Selon les projections, ce réchauffement des températures en hiver va s'accroître dans le Haut Chablais, quelles que soient les altitudes : de +1 à +5°C selon les scénarii, comme le montre la figure 5 ci-dessous.

FIGURE 5 : PROJECTION DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES HIVERNALES ENTRE DÉCEMBRE ET AVRIL DANS LE CHABLAIS (À 900, 1200 ET 2700M)

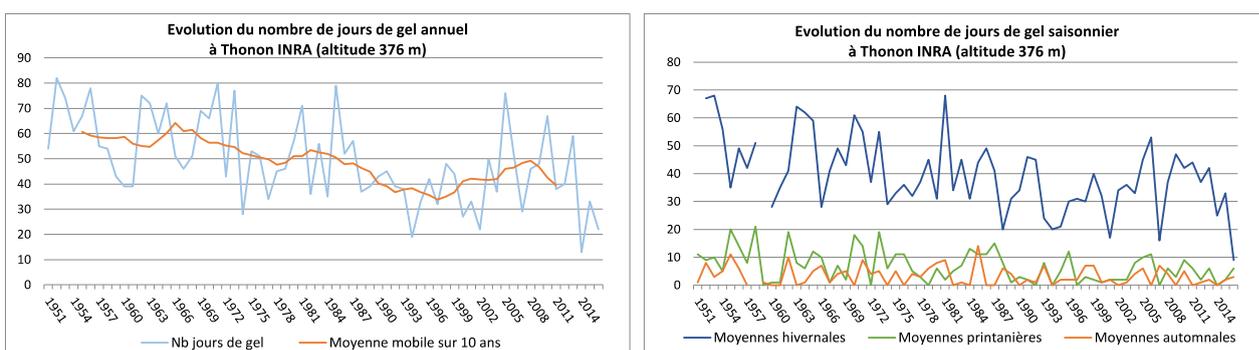


Le questionnement déjà évoqué sur les conditions d'enneigement se pose donc de manière cruciale sur le territoire.

9.2.3 UN NOMBRE DE JOURS DE GEL EN BAISSSE

Si le nombre de jours de gel présente une forte variabilité d'une année sur l'autre, on observe malgré tout une baisse depuis 1957 de 14,2 jours (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a). A cette altitude de Thonon (376 m), l'évolution du nombre de jours de gel saisonniers montre l'impact particulièrement marqué de cette évolution sur la période hivernale, avec une diminution de l'ordre d'une dizaine de jours sur les 65 ans d'observation. On peut cependant se demander si cette évolution du nombre de jours de gel est identique sur l'ensemble des altitudes couvertes par le territoire. Pouvons-nous identifier un seuil altitudinal à partir duquel la variabilité est moins marquée ? Les données disponibles actuellement ne nous permettent pas le dire aujourd'hui.

FIGURE 6 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE JOURS DE GEL PAR AN À THONON INRA (1951-2016 - ALTITUDE 376 M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018A)

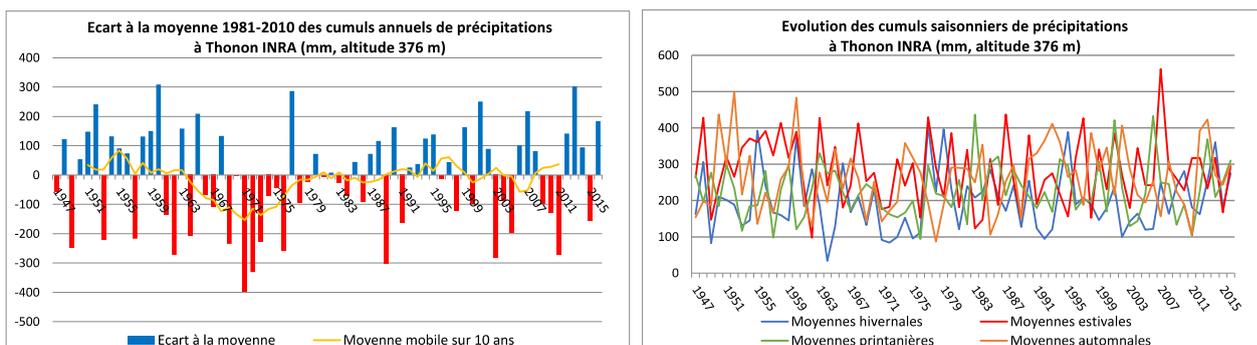


9.2.4 DES PRÉCIPITATIONS TRÈS VARIABLES

Le régime de précipitations enregistrées à la station de Thonon (voir Figure 7) montre une grande variabilité d'une année sur l'autre.

« Le changement climatique crée des effets de dents de scie énormes sur les précipitations ». (BE)

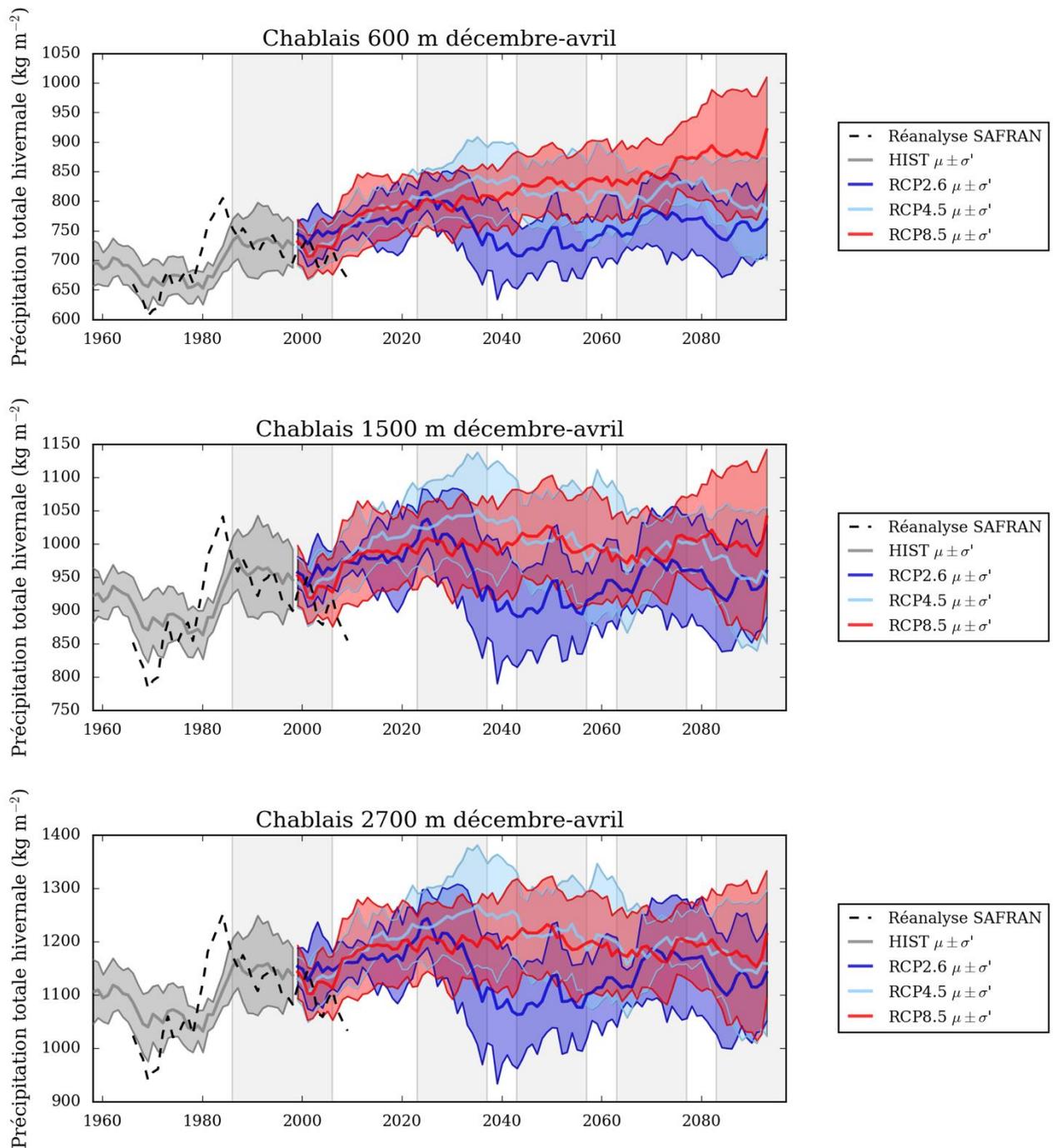
FIGURE 7 : ÉVOLUTION DES CUMULS ANNUELS ET SAISONNIERS DE PRÉCIPITATIONS À THONON INRA (1947-2016 – ALTITUDE 376 M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018A)



Cependant, aucune tendance lourde de modification du régime de pluie n'est pour l'instant observable depuis le début des observations.

Lorsqu'on s'intéresse plus spécifiquement aux précipitations hivernales, les projections pour le Chablais ne permettent pas non plus de définir de grandes tendances pour la fin du siècle, comme c'est plus généralement le cas sur l'ensemble des zones de montagne (voir Figure 8).

FIGURE 8 : PROJECTIONS DES PRÉCIPITATIONS TOTALES HIVERNALES DANS LE CHABLAIS À 600, 1500 ET 2700M



Si les projections restent très incertaines concernant ces précipitations saisonnières, certains acteurs rencontrés font pourtant part d'une **augmentation des sécheresses en été**. Un agriculteur évoque

notamment le fait qu'il ait maintenant à apporter de l'eau à ses brebis dans les prés à 600m d'altitude alors qu'auparavant la rosée du matin présente dans l'herbe suffisait. Néanmoins les observations et connaissances actuelles ne permettent pas donner des tendances très franches sur ce point.

9.2.5 UNE BAISSÉ DE L'ENNEIGEMENT

Une attention particulière est portée sur le territoire aux précipitations neigeuses du fait de l'importance majeure de l'activité touristique hivernale.

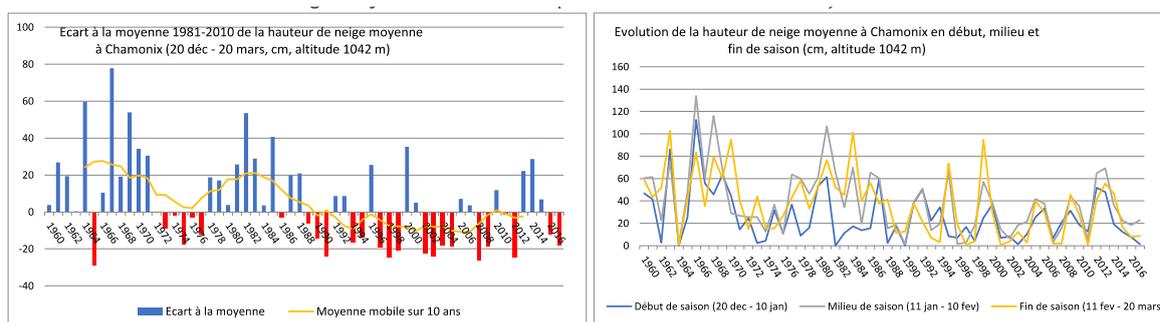
La plupart des personnes rencontrées durant les entretiens font mention d'une baisse de l'enneigement (mise à part, bien entendu l'hiver 2017-2018, période où les entretiens ont été réalisés et qui a été le 7^{ème} hiver le plus enneigé depuis 1959 à l'échelle des Alpes) (Chaix, 2018).

« Ces derniers hivers, la neige tombe très tôt puis disparaît complètement même en altitude. On se dit qu'on est tranquille avec tout ce qui tombe et puis non finalement : des rideaux de pluie tombent en altitude » (une accompagnatrice)

Pour un moniteur de ski rencontré, le tournant a été observé à l'hiver 89/90 : cet hiver-là, les stations n'ont pu ouvrir que très peu de jours. Cette observation est en effet confirmée par la Figure 9 qui montre, à partir de la fin des années 80, le début d'une série d'hivers avec des déficits de neige à Chamonix.

En effet, si l'on n'observe pas de changement du régime de pluie (voir 10.2.3 p.102), la hausse des températures génère une remontée progressive de la limite pluie neige. Même pour cet hiver 2017-2018, pourtant extrêmement neigeux, les fortes chutes de neige ont souvent été suivies d'épisodes pluvieux, entraînant un lessivage constant du manteau neigeux, et des phénomènes d'écoulement inhabituels (avalanche de neige humide notamment, etc.)(Chaix, 2018).

FIGURE 9 : ÉVOLUTION DE LA HAUTEUR DE NEIGE MOYENNE À CHAMONIX (1959-2017 - ALTITUDE 1 042M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)



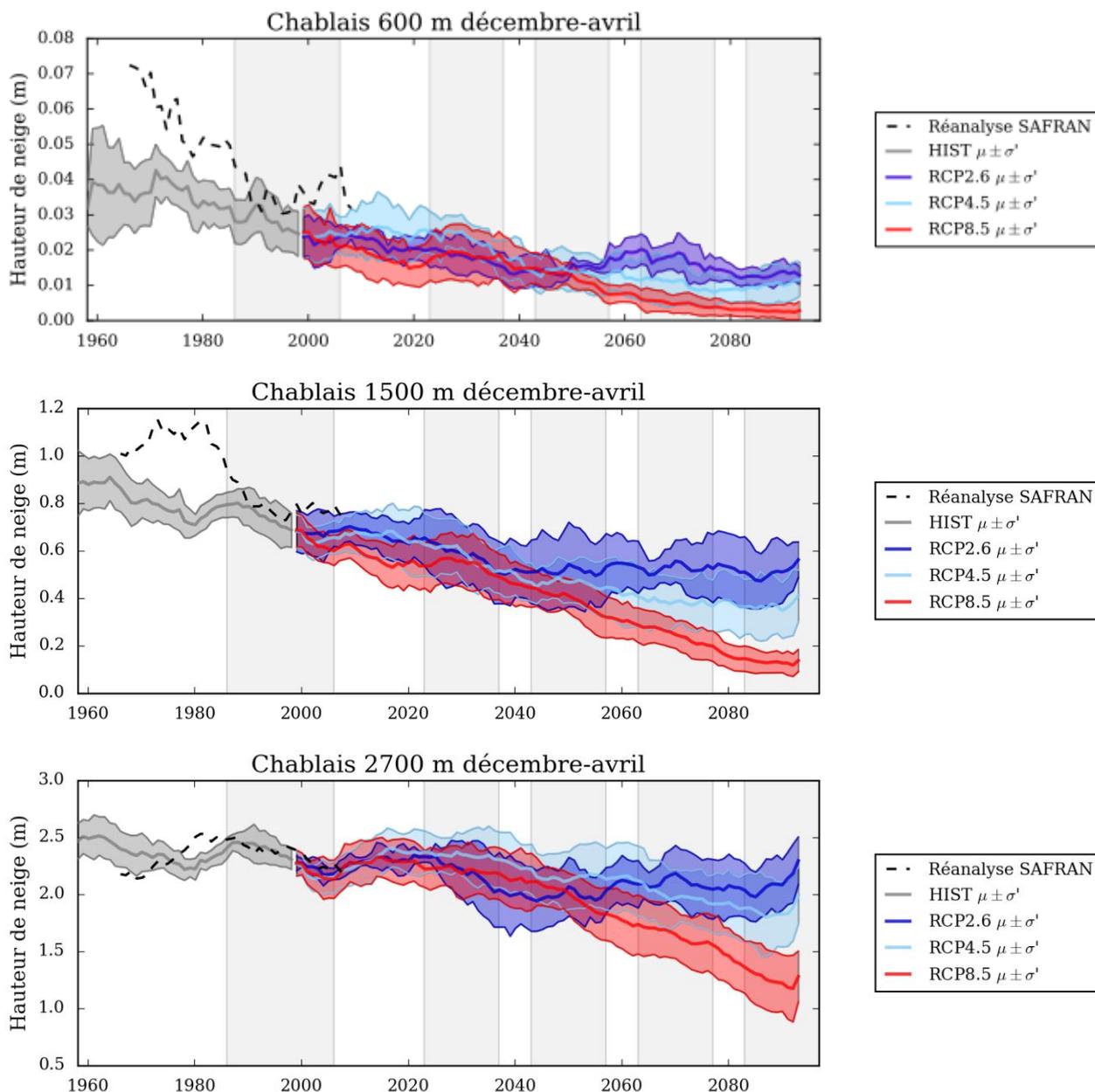
Nous ne disposons pas de données locales issues de relevés précis pour vérifier ces ressentis (les relevés des Gets ayant un historique trop court pour permettre de tirer des tendances climatiques). Néanmoins, les relevés effectués à Chamonix (à 1 042m d'altitude) montrent une baisse de 48,8% des hauteurs de neige (soit -22,2 cm) entre la période récente (1988-2017) et la précédente (1959-1988). Cette baisse est plus particulièrement marquée en fin de saison (-52%) (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018a).

Cette tendance à la baisse observée depuis les années 1960 est intégrée dans la projection visant à simuler les tendances en termes d'enneigement sur le Chablais jusqu'à la fin du siècle. Dans le pire scénario, on note une quasi disparition de celle-ci jusqu'à 1 500 m et un impact moindre à 2 700m (scénario RCP8.5) (voir ci-dessous).

Début de saison (20 déc. – 10 janv.)	-13 cm	-40%
Milieu de saison (11 jan – 10 fév.)	-23 cm	-45%
Fin de saison (11 fév. – 20 mars)	-25 cm	-52%

TABEAU 2 : EVOLUTION DE LA HAUTEUR DE NEIGE MOYENNE EN DÉBUT, MILIEU ET FIN DE SAISON À CHAMONIX (1959-2017 - ALTITUDE 1 042M)

FIGURE 10 : PROJECTION DE LA HAUTEUR DE NEIGE DANS LE CHABLAIS À 600, 1500 ET 2700 M



Ces résultats font écho aux inquiétudes déjà relevées dans l'étude menée par la CCHC et RAEE concernant l'activité touristique hivernale. Ils doivent induire pour l'ensemble du territoire une réflexion de fond sur les enjeux en termes d'activité économique pour les décennies à venir dans cette perspective de modification profonde et continue des conditions d'enneigement.

9.2.6 AUTRES CHANGEMENTS OBSERVÉS SUR LE TERRITOIRE

« Ce qu'on observe surtout, plus que du réchauffement des températures ce sont de grandes variations de températures au sein de la saison, c'est ça qui est le plus difficile à gérer. » (Un responsable de remontées mécaniques)

Au-delà d'un réchauffement global, ce que notent les personnes rencontrées lors des entretiens, c'est une variation importante des conditions météorologiques, et notamment des températures, avec une alternance d'épisodes de neige et d'épisodes de pluie, comme s'il y avait « quinze saisons en une ».

« En hiver, on passe de -10°C à +10°C. » (Une agricultrice).

Le résultat est que les saisons sont moins marquées ce qui induit une nécessaire adaptation des pratiques tant dans l'industrie des sports d'hiver que dans l'agriculture ou la sylviculture.

Cette variabilité génère de fortes incertitudes et remet en cause les connaissances acquises sur le climat : il semble désormais difficile de dire qu'août est le mois des orages par exemple, ces derniers pouvant se produire également au printemps ou en tout début d'été. Associés à la fonte des neiges, ils peuvent provoquer de nouveaux risques, obligeant à questionner les modalités de gestion.

Certaines personnes rencontrées parlent aussi de décalages de saison. Un botaniste évoque ainsi certains faits tels que des oiseaux qui se reproduisent plus précocement, l'apparition de chenilles plus avancée dans le temps, elle-même liée à une feuillaison plus précoce. Un agriculteur mentionne qu'il laisse plus longtemps ses brebis à l'extérieur à l'automne et qu'il les sort plus tôt au printemps, modifiant ainsi la gestion de son troupeau et de son alimentation.

Plusieurs acteurs rencontrés évoquent enfin une augmentation de la fréquence des tempêtes et événements venteux. Selon un technicien de l'ONF, cette recrudescence est confirmée par les bases de données du service de Restauration des Terrains en Montagne (RTM).

Nous n'avons pas d'éléments d'observations en terme climatique pour illustrer ces phénomènes. Si les connaissances scientifiques existantes sont pour la plupart confirmées par les observations faites directement sur le terrain par les acteurs, d'autres paramètres mériteraient ainsi d'être étudiée plus spécifiquement sur le territoire du Haut Chablais pour estimer leur évolution et en étudier les conséquences possibles.

A ce titre, comme nous l'avons montré au travers de certains extraits d'entretiens, certaines de ces conséquences sont d'ores et déjà bien identifiées au sein du territoire. Nous proposons ainsi dans la section suivante de détailler quels sont les enjeux perçus du changement climatique sur le Haut Chablais.

9.3 LES ENJEUX TERRITORIAUX EN LIEN AVEC LE CHANGEMENT CLIMATIQUE

Cette partie vise à présenter les enjeux du Haut-Chablais associés au changement climatique, tels qu’ont pu nous en faire part les acteurs rencontrés lors des entretiens.

Nous avons identifié 8 enjeux principaux (l’ordre de présentation ne correspond pas à un ordre d’importance) :

- L’eau : répondre aux besoins et faire face aux risques de crues et de glissement de terrain
- Le maintien et la diversification des activités économiques
- La préservation de la biodiversité
- La préservation des paysages
- La préservation de la santé et de la sécurité
- Le maintien d’un équilibre au sien du territoire
- La gouvernance : construction collective du territoire
- La production et la consommation d’énergie

Il apparait clairement que le changement climatique ne va pas générer de nouveaux enjeux en soi. Il est le plus souvent perçu comme impactant le territoire au même titre que d’autres éléments, mais pouvant jouer comme un accélérateur ou un révélateur de certaines priorités.

9.3.1 L’EAU : RÉPONDRE AUX BESOINS ET FAIRE FACE AUX RISQUES DE CRUES

L’eau constitue un des enjeux phares, sinon critiques, pour le territoire, que cela soit en termes de disponibilité de la ressource ou de risque de crue. Le changement climatique apparait ici comme une pression supplémentaire sur le milieu.

9.3.2 DES PRESSIONS SUR LA DISPONIBILITÉ EN EAU

L’évolution du régime pluvio-nival des Dranses (principal réseau hydrographique du Haut Chablais, relié au Lac Léman), associée à des aquifères karstiques qui complique le stockage d’eau et à des consommations importantes à certaines périodes du fait de l’économie du tourisme, génèrent des tensions sur le plan de la disponibilité de la ressource sur le territoire qui risquent de se renforcer sous l’effet du changement climatique.

Le diagnostic du contrat de rivière fait ainsi mention de déficits hydrologiques saisonniers (en période d’étiage estival ou hivernal) avec des réductions de débit de l’ordre de 5 à 15% pour la Dranse de Morzine. Le changement climatique est susceptible d’accentuer encore ces pressions (5 à 10% supplémentaire) alors que la demande reste forte en périodes d’étiage dans ce secteur particulièrement marqué par l’activité touristique (SIAC, 2017c).

Le développement de la neige de culture est aussi au centre des débats. Pas vraiment problématique pour le SIAC, certains élus de la CCHC en font une question importante, notamment du fait de la localisation du territoire en tête de bassin :

« Il faut parler RESSOURCE en eau : de combien d’eau on a besoin pour que les poissons vivent dedans. En janvier : tous les touristes, la neige de culture, au moment où j’ai le moins d’eau. Donc plus de débit suffisant dans la rivière. Cela n’est pas pris en compte jusqu’à maintenant. Dans le cadre du nouveau schéma directeur de l’eau, on était à deux doigts d’aller vers une situation critique mais les élus n’ont pas voulu. C’est difficile de dire si la situation actuelle sur l’eau est liée au changement climatique ou pas. Probablement un facteur. On a des précipitations qui modulent beaucoup. C’est une question à

creuser. Mais l'autre facteur c'est l'augmentation des lits en station. La neige de culture c'est parfois un faux problème, mais peut être aussi une solution : on met de l'argent dans des réservoirs et on va en avoir besoin pour restituer l'eau quand il n'y en a pas » (élu du SIAC)

Selon le diagnostic effectué dans le cadre du contrat de rivière des Dranses, les consommations sont principalement liées à l'usage d'eau potable (80%) (SIAC, 2017c). Une des problématiques du territoire est l'accroissement important des consommations en hiver du fait de l'activité touristique qui coïncide avec la période d'étiage hivernal. Autrement dit, c'est quand la ressource est la plus faible que les consommations sont les plus importantes. Cette question n'est pas nouvelle pour le territoire : la station des Gets s'est retrouvée dès les années 80 confrontée à des problèmes d'approvisionnement en eau potable du fait d'un sous-calibrage du réseau d'eau au regard du nombre de lits. Or, les pressions s'accroissent sur la ressource avec la hausse constante des lits touristiques en station.

Un autre élément souvent relevé par les acteurs rencontrés est le développement des enneigeurs (voir 9.3.5, p.90), et l'aménagement des retenues collinaires induit afin de stocker l'eau. Pour certains, ils contribuent aux pressions quantitatives exercées sur la ressource en eau. Pour d'autres, les enneigeurs peuvent à terme représenter une solution, permettant de disposer d'une ressource d'eau quand cela est nécessaire.

Pour certaines personnes, le changement climatique va peut-être générer à terme d'autres pratiques. Un agriculteur évoque ainsi le fait qu'il ait maintenant à apporter de l'eau à ses brebis dans les prés à 600m d'altitude alors que la rosée présente dans l'herbe suffisait jusque-là.

Ces pressions supplémentaires doivent interroger sur la ressource subsistant pour le milieu et le débit nécessaire pour la bonne santé des écosystèmes mais aussi pour la continuité d'autres activités humaines : barrage électrique, usage de loisirs (kayak, pêche notamment).

9.3.3 RISQUES DE CRUES, DE GLISSEMENT DE TERRAIN ET D'ÉROSION

« Moi, ce qui m'inquiète c'est les inondations en janvier, je n'avais jamais vu ça, c'est carrément inquiétant. » (une élue)

Le phénomène de crue n'est pas nouveau pour le territoire, comme en témoigne la crue importante de 1968¹⁴. Ce qui diffère cependant, ce sont les crues en hiver, au moment de la période d'étiage. Le territoire a connu des crues importantes et dévastatrices en 2015 du fait de précipitations record (sachant que les observations ne vont pas au-delà de 1970). Des morceaux de route ont été emportés. Un petit épisode de crue a également été observé à l'hiver 2018. Selon un technicien du service RTM, cet enchaînement de deux événements marquants successifs était assez rare avant.

Si l'enjeu est important c'est que la vallée de Morzine constitue une « grosse chasse d'eau » (un bureau d'étude) : l'eau transite vite et facilite donc les phénomènes de crue. La question est donc : comment ralentir un peu l'eau pour qu'elle fasse moins de dégâts. Or, la construction des digues réalisées sur la Dranse afin de construire la route ont rendu le cours d'eau rectiligne : cela accélère le mouvement et interroge à terme sur l'impact sur la route, mais aussi plus globalement sur les glissements de terrain que

¹⁴ L'orage très violent du 21 septembre 1968 qui s'est abattu sur le Chablais, a provoqué une importante crue de la Dranse; le débit de la rivière a été multiplié par 20 dans l'espace d'une journée (débit de 42.2 m³/S au Reyvroz pour un débit moyen mensuel de 13,3) (DREAL Auvergne-Rhône-Alpes, 2018). « *Outre des effondrements en divers points de la route qui emprunte cette vallée, les culées du pont de Vongy ont été affouillées* ». (Hubert, Marin, Meybeck, Olive, & Siwertz, 1969)

les crues peuvent générer. Par exemple, la zone de fracture du glissement de Reyvroz (1 million de m³) s'est réactivée en mars 2017 à la suite de précipitations importantes (selon un technicien du RTM).

L'érosion des sols peut également être renforcée par les pluies importantes. Le Chablais bénéficie cependant encore de sols assez végétalisés qui le protègent de cet aléa. Le risque existe cependant sur les pistes de ski terrassées sur lesquelles le sol est laissé nu. L'augmentation de fortes précipitations en hiver, lorsque la végétation est peu développée, accroît ainsi la pression sur les sols.

La gestion des risques est donc questionnée par les manifestations visibles du changement climatique. Au-delà des services directement impliqués (service RTM notamment), cette question concerne le territoire dans son ensemble au travers des perturbations que peuvent provoquer les crues et glissements de terrain, notamment en termes de mobilité et d'accessibilité, dans des périodes critiques pour l'activité touristique (période hivernale).

9.3.4 MAINTIEN ET DIVERSIFICATION DES ACTIVITÉS ÉCONOMIQUES

Les effets locaux du changement climatique viennent donc interroger le développement économique du territoire : quels vont être les impacts sur une activité touristique hivernale, qui apparaît particulièrement vulnérable ? Comment y pallier ? Quelles opportunités peut-on en retirer ?

9.3.5 TOURISME

9.3.5.1 L'IMPORTANCE DU TOURISME HIVERNAL

Le territoire est aujourd'hui économiquement dépendant de l'activité touristique. En effet, selon une étude de l'Agence économique du Haut Chablais (Chablais Léman Développement) en 2014, « *l'économie locale repose avant tout sur le tourisme (20 % de l'emploi-salarié soit le double de la Haute-Savoie) ainsi que les activités résidentielles, c'est-à-dire celles destinées à satisfaire les besoins de la population locale (commerce, services à la personne...)* » (CLD – RAA, 2015).

L'activité est principalement concentrée sur le domaine skiable des Portes du Soleil¹⁵, où elle représente 54% des emplois du secteur privé (principalement dans les remontées mécaniques, les hébergements marchands et la restauration). A l'échelle de la communauté de commune du Haut Chablais, cette activité touristique représente 18% de l'emploi total, contre 7% à l'échelle de Rhône Alpes (EPODE et al., 2017).

Comme le montre la Figure 10 cette activité dominante est non seulement concentrée dans l'espace, mais aussi dans le temps, puisque l'essentiel des nuitées concerne la période hivernale.

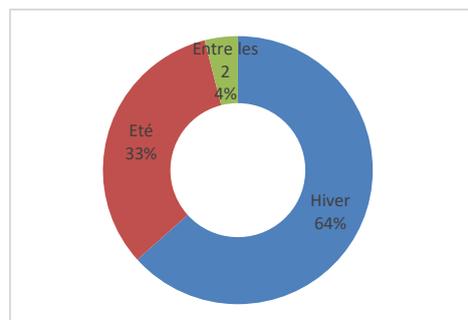


FIGURE 11 : RÉPARTITION ANNUELLE DU NOMBRE DE NUITÉES À L'ÉCHELLE DU CHABLAIS (EPODE ET AL., 2017)

¹⁵ Les Portes du Soleil constitue un domaine skiable franco-suisse regroupant 12 stations du massif du Chablais (dont Abondance, Avoriaz, La Chapelle d'Abondance, Châtel, Les Gets, Montriond, Morzine, Saint Jean d'Aulps). Avec 650 km de pistes et 200 remontées mécaniques, il est présenté comme l'un des plus grands domaines skiables du monde. (<http://www.portesdusoleil.com>)

9.3.5.2 IMPACTS DE LA BAISSÉ DE L'ENNEIGEMENT

Un chargé de mission de la CHCC évoque le fait que le territoire est déjà impacté par le changement climatique avec une baisse du chiffre d'affaire de 20%. Par ailleurs, le phénomène a influencé la fermeture de la station du col du Corbier.

Cependant, les effets ne sont pas homogènes sur le territoire. Les stations de moyenne montagne sont plus vulnérables au manque d'enneigement. Avoriaz y voit au contraire une opportunité, considérée comme l'une des trois réserves de neiges de la Haute-Savoie (avec Chamonix et le Grand Massif), voire comme un « *trou à neige* » (une des stations les plus enneigées pour cette altitude du fait de la présence du Lac Léman). Le manque de neige dans les stations plus basses en altitude provoque ainsi un repli des pratiquants et touristes vers Avoriaz qui profite ainsi de son enneigement exceptionnel. Ce qui fait dire à un responsable de remontées mécaniques : « *nous serons les derniers des mohicans* ».

9.3.5.3 VERS UNE ADAPTATION : L'AMÉNAGEMENT DES PISTES ET LA DIVERSIFICATION

Qu'il s'agisse de la baisse de l'enneigement ou de l'évolution des pratiques touristiques, la question de l'adaptation des stations de sport d'hiver aux changements n'est pas nouvelle :

« Ça fait 30 ans qu'on se pose la question de la diversification mais ça ne marche pas, ça ne suffit pas pour remplacer la neige » (un élu).

Cette adaptation passe en grande partie par un fort investissement dans la gestion des domaines skiables : reprofilage des pistes, amélioration du damage et développement des enneigeurs sur le territoire depuis l'hiver 89/90. Ceux-ci permettent de maintenir les skieurs dans les stations du Haut-Chablais, comme le souligne un moniteur de ski :

« Avant, il y avait déjà des problèmes de neige. On allait à Praz de Lys du Sommand, on emmenait nos classes de neige là-bas. Les canons ont permis de pérenniser l'enneigement. Maintenant on ne se déplace plus, même pour le ski de fond, mais c'est sur le fil du rasoir. ».

Les enneigeurs permettent ainsi de maintenir les petites stations ouvertes, mais ce même moniteur ajoute :

« C'est bien parce que notre clientèle n'a pas les moyens d'aller dans les grandes stations. »

Une autre façon de s'adapter passe par une baisse des investissements dans l'équipement comme par exemple l'achat par la commune de Bellevaux de remontées mécaniques d'occasion et non pas neuves pour baisser les coûts et les temps d'amortissement.

Par ailleurs, les touristes semblent également s'adapter, et d'après un moniteur de ski, leurs attentes sont moins élevées en ce qui concerne la qualité de la neige.

Certains acteurs s'interrogent cependant sur la pertinence de ce développement à terme :

« La neige de culture a ses limites. Elle apporte un confort en début de saison. Une bande de neige, c'est invendable. Si le gamin ne peut pas faire son bonhomme de neige, il ne viendra pas. » (un élu).

Ici, une association environnementale s'interroge sur les impacts et les coûts :

« L'adaptation se fait à très court terme : on installe des canons à neige. On se rend compte que finalement ça ne marche pas, il fait trop chaud, donc on met en place des usines à neige. On fait un meilleur traitement des pistes de neige pour pouvoir skier sur moins de neige, on achète des engins plus performants pour damer 30 cm. Mais si on ne dit pas combien cela coûte

réellement, personne ne se rend compte. Il faudrait mener une étude sur le coût global. » (un responsable d'association environnementale)

La diversification et le développement du « quatre saisons » est également évoqué de façon récurrente par les acteurs. Dans ce sens, le fort développement du VTT est souvent évoqué sur le territoire, avec une saison qui commence début mai et se termine fin septembre. A tel point que Morzine serait devenu « *une des principales places du vélo dans le monde* », selon un commerçant. Achat de fat bike (larges roues), de vélos électriques, aménagement des remontées mécaniques, création d'itinéraires de descente plus faciles que les descentes VTT, installation de bornes électriques en haut des cols, service d'échange de batteries sont autant d'investissements réalisés afin de faciliter le développement de cette activité.

D'autres activités sont proposées pour élargir l'offre déjà existante :

- Préparation à l'ultra-trail
- Aménagement des retenues collinaires pour l'été
- Développement d'outils visant à mieux connaître les pratiques et besoins des clients
- Développement d'évènements

Cependant, ces nouvelles activités ne sont pas sans impact sur le milieu naturel (faune, sols et flore) et posent des problèmes de cohabitation avec d'autres activités. Certains accompagnateurs de moyenne montagne modifient ainsi leur parcours de randonnée désormais trop empruntés par les vélos :

« Beaucoup de gens sont frustrés, trouvent que Morzine est un enfer avec tous les vélos » (une accompagnatrice de montagne).

On peut finalement percevoir une sorte d'usure dans cette volonté de diversifier l'activité touristique chez certains des acteurs rencontrés :

« Il faut diversifier mais à un moment donné on n'a plus d'idées. » (un commerçant).

De plus, c'est bien l'activité hivernale qui rapporte toujours le plus :

« Le chiffre d'affaire estival total équivaut à une semaine de février (voire, un gros week-end de février). Tout le monde sait que ça va s'arrêter mais à trente ans c'est viable. » (un élu).

Des doutes apparaissent sur la possibilité même de questionner le modèle, comme s'il s'auto-entraînait :

- *« Comment concilier l'objectif de 20 000 lits et le fait de s'adapter ? »* (un représentant d'association environnementale)
- *« On vit ici sur un modèle dépassé, on est à la limite du déclin. Mais les investissements sont tels qu'il est difficile de dire des choses. Il faut nourrir la bête. »* (une accompagnatrice de montagne)

Le tourisme, activité majeure du territoire, apparaît ainsi comme l'une des premières victimes du changement climatique et les acteurs semblent en avoir une conscience claire. Cependant, les avis divergent sur les moyens de s'adapter à cette situation. Pour certains, continuer à investir autant que nécessaire pour maintenir le système actuel tant que cela reste possible et là où c'est le plus pertinent est la solution. Pour d'autres, trouver d'autres formes de tourisme, diversifier, ouvrir sur d'autres activités constitue un impératif et en même temps une opportunité de renouvellement économique pour le territoire.

9.3.6 AGRICULTURE

Au regard d'autres problèmes, notamment les conflits d'usage avec le développement de l'activité VTT, la pression de l'urbanisme, la faiblesse des cours, le développement de maladies, etc., le changement climatique n'est pas considéré comme un enjeu réel pour les agriculteurs rencontrés. Ils notent cependant

des effets positifs comme le fait que l'herbe pousse plus et que cela permette deux fauches par an ou la possibilité de laisser les animaux dehors plus longtemps (à l'automne comme au printemps).

Par contre, cela induit également un changement de pratiques qui peut apparaître de façon plus négative, comme par exemple le fait de devoir apporter de l'eau aux bêtes l'été autour de 800m, qui génère un surcroît de travail dans une période déjà tendue (en pleine période des foins).

Ils notent également un assèchement plus important des prairies sur les pentes. Par ailleurs, Les prairies naturelles des zones humides du haut Chablais, qui ont jusqu'à présent peu souffert de sécheresses, semblent plus qu'ailleurs dégradées par des invasions de campagnols (Guillot, 2017). Cela est souligné par une agricultrice qui évoque, à propos des dégâts provoqués par les mulots :

« On est obligé de herser, c'est un massacre. Cela fait baisser la rentabilité. »

Au premier abord la question du changement climatique ne semble donc pas être un problème majeur pour les agriculteurs. Il peut même être remis en cause dans certains cas, les évolutions climatiques étant considérées comme un phénomène normal et ancien. Pourtant, certains des problèmes évoqués au départ comme beaucoup plus préoccupants peuvent être directement reliés au changement climatique. C'est le cas par exemple du développement de certaines maladies ou parasites pouvant concerner tant les animaux que les végétaux. C'est aussi le cas concernant le conflit d'usage avec les pratiquants de VTT, qui, comme nous l'avons vu au 9.3.5, peut être considéré comme une réponse possible à la diminution de l'enneigement observée ces dernières décennies.

9.3.7 LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : UNE OPPORTUNITÉ POUR DÉVELOPPER UN NOUVEAU MODÈLE ÉCONOMIQUE POUR LA VALLÉE ?

Si l'évocation du changement climatique renvoie le plus souvent à des problèmes, certains acteurs au sein de la CCHC expriment néanmoins leur souhait de considérer le changement climatique comme une opportunité obligeant à réinterroger les choix actuels et de s'engager vers une diversification du modèle économique de la vallée. Certaines pistes alors sont évoquées, comme par exemple :

- La structuration de la filière bois
- Le développement d'espace de co-working
- La mise en valeur des producteurs locaux en lien avec le géopark

9.3.8 PRÉSERVATION DE LA BIODIVERSITÉ

Le changement climatique impacte et va impacter la biodiversité du Haut-Chablais. Plus qu'une révolution ou une extinction de masse, il s'agit d'une évolution lente et progressive qui avance par petites touches.

9.3.8.1 UNE REMONTÉE D'ESPÈCES EN LATITUDE

Les observations d'un botaniste à l'échelle de la Haute-Savoie montre que certaines espèces végétales remontent du sud avec les éléments les plus marquants que sont : une espèce d'orchidée, la *barli robertiana*, (qui était située sur le littoral méditerranéen il y a 40/50 ans), l'orchis *spitzelii* (observée dans les Bauges il y a 15 ans, l'année dernière à la Chapelle d'Abondance), la *dittrichia viscosa* (retrouvée il y a trois ans au pied du Saleve), les astéracées à fleurs jaunes (qui explosent un peu dans tout le territoire).

Au niveau de la faune, le premier chacal doré a été observé dans le Chablais cet hiver.

9.3.8.2 UNE REMONTÉE D'ESPÈCES EN ALTITUDE

Du fait du réchauffement des températures, les espèces remontent progressivement en altitude également. Autour de cette question, un enjeu important pour le territoire est la remontée de la forêt au détriment des alpages, et cela pour des raisons paysagères, économiques (domaine skiable) mais aussi de biotope (notamment pour le tétralyre et le lagopède, voir ci-dessous). Cette remontée est observée par un grand nombre d'acteurs. Il ne s'agit cependant pas pour l'instant de la remontée d'un étage entier mais plutôt d'intrusion de certaines espèces par pointes. Celle-ci n'est pas à imputer au seul changement climatique : l'abandon progressif des pâturages par les agriculteurs y est également pour beaucoup. Au final, la forêt ne fait que reprendre sa place. Mais, pour le botaniste rencontré : « *C'est une évidence que ça va monter* ».

9.3.8.3 AUJOURD'HUI, UN BILAN POSITIF ?

Aujourd'hui, d'après les personnes rencontrées, on n'observe pas encore vraiment de plante qui régresse : « *Pour l'instant, on gagne plus d'espèces qu'on en perd* » (un botaniste). Par ailleurs, le changement climatique peut aussi être vu comme une opportunité pour les oiseaux migrateurs qui arrivent désormais à trouver de la nourriture toute l'année et n'ont plus forcément besoin de partir.

Finalement, les régressions observées aujourd'hui sont plus liées aux activités humaines directes (construction, épandage dans l'agriculture) qu'au changement climatique. De ce fait, on peut observer la disparition de biotopes mais pas forcément d'espèces.

9.3.8.4 MAIS À TERME... ?

A terme cependant, l'impact pourrait être plus négatif qu'il ne l'est aujourd'hui.

« *Quand on perd des espèces, c'est souvent des espèces d'intérêt* » (un botaniste).

Des espèces risquent d'être impactées du fait du réchauffement progressif des températures : à un moment donné, elles ne pourront plus remonter en altitude. Concernant la flore, il s'agit plus particulièrement des espèces poussant au froid dans les tourbières. Or, certaines plantes se déplacent plus facilement que d'autres. Il est donc possible que certaines disparaissent.

La faune est tout autant vulnérable à terme. Le tétralyre et le lagopède risquent d'être très impactés par le changement climatique, subissant un double effet : (1) la remontée de la forêt (alors que leur habitat est la bande entre la forêt et la prairie) et (2) la baisse de l'enneigement et d'hivers bien marqués. Aujourd'hui, la tendance est à la stabilité, d'après les comptages effectués par la fédération de chasse. Le projet d'observatoire porté par la Fédération de chasse 74 dans le cadre d'un projet Interreg, en partenariat avec les Portes du Soleil va dans ce sens. L'idée est en effet de mettre à disposition des données auprès des stations afin de les aider à prendre en compte le tétralyre dans leur choix d'aménagement.

9.3.8.5 LE DÉVELOPPEMENT DES PLANTES INVASIVES

Un autre enjeu de biodiversité lié au changement climatique est le possible développement des plantes invasives (c'est-à-dire de plantes exotiques qui peuvent générer des nuisances). On observe déjà des essences qui progressent de plus en plus mais pour lesquelles il est difficile de parler de plantes invasives, comme la linule graveaolens que l'on peut observer le long des autoroutes mais qui n'est pas d'origine exotique (méditerranéenne). Le séneçon du cap se développe également beaucoup mais il est difficile d'établir un lien direct avec le changement climatique.

9.3.8.6 LA GESTION DES FORÊTS

Un des enjeux forts en lien avec cette évolution de la biodiversité, et plus globalement le changement climatique, est la gestion des forêts du fait de la fragilisation des essences et de la difficulté de savoir quelle essence planter aujourd'hui.

Les forestiers observent globalement une recrudescence de maladies qui fragilisent les essences. Les frênes sont touchés par la scalarose ils ne sont désormais plus plantés. Les épicéas sont, eux, très impactés par des attaques de scolytes à répétition. Avant, les attaques revenaient tous les 10 ans. Aujourd'hui, c'est la fréquence de retour s'est accrue et cela en raison de deux facteurs : 1) les insectes ne disparaissent plus du fait de l'absence de périodes froides et 2) les arbres sont plus fragiles à cause de la sécheresse. Or il n'existe pas vraiment de moyen de lutte contre les scolytes (les pièges à phéromone ne fonctionnent pas très bien). En termes de prévention, il faut enlever les troncs attaqués parce que les scolytes se mettent sous l'écorce. Le problème c'est qu'il est souvent trop tard : une fois l'arbre mort, l'insecte est déjà parti.

Une autre problématique à laquelle les forestiers sont confrontés est l'anticipation des essences à planter : « *concrètement, quand on régénère une forêt, est-ce que l'épicéa va arriver à maturité ?* », et, à côté de cela, « *on a des essences plus maritimes qui pourraient être plus adaptés dans 100 ans mais qui aujourd'hui ne sont pas adaptés* » (une responsable ONF). Les hêtres et les sapins prennent progressivement la place de l'épicéa mais la transformation de ces essences est moins maîtrisée localement. Le hêtre en montagne a trop de tensions pour faire du bois d'œuvre et se trouve plutôt utilisé comme bois de chauffe ou de palette.

La réponse aujourd'hui apportée par l'ONF en termes de gestion est double : 1) la diversité génotypique et d'essences et 2) la régénération naturelle.

9.3.9 PRÉSERVATION DE LA SANTÉ ET DE LA SÉCURITÉ

L'impact sanitaire et sécuritaire du changement climatique sur le territoire a souvent été abordé par les acteurs rencontrés. Celui-ci prend plusieurs formes : l'arrivée de nouveaux éléments pathogènes, l'évolution des risques naturels et la possible dégradation de la qualité de l'air.

9.3.9.1 DE NOUVEAUX ÉLÉMENTS PATHOGÈNES

Selon un technicien faune, flore & chasse, de nouvelles problématiques apparaissent avec le changement climatique. A l'hiver 2018, le territoire a été touché par la fièvre catarrhale (liée à un insecte qui n'était pas présent avant). On observe également des pathologies liées aux tiques : une espèce comme les chamois qui n'avaient pas de problèmes de tiques en est maintenant victime avec, comme conséquence, le développement d'ehrlichioses qui peuvent provoquer des mortalités, des avortements et potentiellement une zoonose (transmissible à l'homme ou aux vaches). Cette prolifération des tiques jusqu'à 1 300m pose aussi des problèmes pour les humains, notamment pour les techniciens de l'ONF, particulièrement exposés au risque.

Des techniciens environnement rencontrés évoquent également l'apparition de pathologies qui arrivent d'Afrique : la fièvre du Nil, le chikungunya.

Avec une situation variable et contrastée vis-à-vis de l'exposition du territoire aux risques naturels, la question de l'évolution des risques naturels associée au changement climatique n'apparaît pas, pour les acteurs du Haut-Chablais comme aussi prégnante qu'elle pourrait être pour d'autres secteurs ou thématiques.

Cependant, du fait de sa situation de territoire de moyenne montagne dans un contexte d'évolutions climatiques, la question des risques naturels est amenée à évoluer au cours des prochaines années

9.3.9.2 L'ÉVOLUTION DU RISQUE D'AVALANCHE

Au niveau du risque lié à l'évolution des régimes avalancheux deux points émergent.

Tout d'abord, du fait de la remontée de la ligne de neige, on peut s'attendre à une diminution du nombre d'avalanches aux basses altitudes.

Ensuite, en raison de la transformation de la saisonnalité, qui se traduit par de très fortes variations de températures à l'intérieure d'une même saison, on peut s'attendre à la transformation des types d'avalanches avec une augmentation des avalanches de type humide pouvant être à l'origine de coulées très étendues spatialement et générant des pressions plus importantes que les écoulements froids et secs.

De plus, la transformation de la saisonnalité peut être également à l'origine d'un nouveau type de risque caractérisé par un phénomène de « pluie sur neige » qui se traduit par des écoulements d'eau sur neige pouvant être importants. Ces phénomènes ont beaucoup été observés en ce début d'année (janvier 2018) dans un contexte d'un mois de janvier particulièrement chaud intercalé au milieu d'un hiver froid et présentant un enneigement important.

9.3.9.3 LES INCENDIES

De même que pour les avalanches, l'augmentation du risque incendie, bien que n'étant pas particulièrement important dans le Haut-Chablais est lié, à l'instar de toutes les alpes du nord, à un changement de saisonnalité. Cela se traduit notamment par un allongement de la saison des feux de forêt au printemps.

9.3.10 QUALITÉ DE L'AIR

Du fait de la proximité de la vallée de l'Arve, la question de la qualité de l'air est souvent évoquée par les acteurs rencontrés. Il est cependant difficile de faire un bilan de l'état de celle-ci dans le Haut-Chablais, le territoire ne disposant pas de stations de mesure. Certaines personnes s'inquiètent et évoquent les couleurs étranges du ciel qu'ils ne voyaient pas avant (des nuages jaunes). Cependant, aucune observation concrète ne permet de vérifier la pertinence de ces craintes.

Les enjeux avec le changement climatique sont de deux ordres :

- Le réchauffement des températures l'hiver est susceptible d'élever l'altitude des inversions de températures, phénomène qui ne permet pas la dispersion des polluants en les maintenant au contraire dans la vallée. Selon un représentant d'une association environnementale, le niveau se situerait aujourd'hui autour de 1200m. Dans ce sens, celui-ci regrette qu'aucune réflexion ne soit menée à l'échelle du territoire sur l'impact des foyers fermés et de leur impact sur la qualité de l'air.
- Le réchauffement des températures l'été favorisera les épisodes de pollution à l'ozone qui remonte en altitude

9.3.11 MAINTIEN D'UN ÉQUILIBRE AU SEIN DU TERRITOIRE

Le territoire repose aujourd'hui sur un équilibre entre la haute vallée et le bas avec des inégalités de revenus et d'activités : « *les moyennes stations se considèrent comme les banlieues ouvrières* » (*un exploitant de remontées mécanique*). A terme, le changement climatique risque d'accentuer ces disparités

en concentrant l'activité touristique et la production de richesse sur une ou deux communes, favorisant peut-être l'accroissement des inégalités en termes de prix du foncier, etc.

9.3.12 GOUVERNANCE : CONSTRUCTION COLLECTIVE DU TERRITOIRE

Les effets du changement climatique nécessitent des approches concertées afin de faire émerger des solutions adaptées et pertinentes pour le territoire au regard des enjeux des uns et des autres. La vallée dispose pour cela d'atouts sous la forme de structures favorisant le dialogue : la CCHC, le Geopark, le SIAC, Natura 2000.

Cependant, certains acteurs regrettent des modes de travail encore cloisonnés qui nécessiteraient d'évoluer vers plus de dialogue (comme par exemple dans le tourisme ou l'agriculture).

Par ailleurs, des inquiétudes sont exprimées sur le manque de prise de conscience du changement climatique et de ses effets, l'absence de données ou de suivi sur le sujet. Pour beaucoup, le système est aujourd'hui encore tellement rentable économiquement qu'il n'y a pas d'intérêt à le questionner. Une autre raison est évoquée : « *Le système de saison est particulier, c'est un rythme à part. On est fatigué le soir, on n'a pas forcément envie de s'informer, c'est peut-être aussi pour ça qu'on change pas de modèle.* » (une accompagnatrice de montagne)

Des volontés existent sur le territoire malgré tout :

- « *Se mettre en réseau, permet de garder l'envie, se sentir moins seuls, se rendre compte que les autres ont les mêmes difficultés.* » (Une association environnementale)
- « *Si on connaît mieux ce que fait l'autre on est plus à même de comprendre* » (une accompagnatrice de montagne)

9.3.13 PRODUCTION ET CONSOMMATION D'ÉNERGIE

L'impact du changement climatique sur l'énergie est ambivalent. D'un côté, des consommations peuvent augmenter du fait de nouveaux usages (comme la production de neige de culture par exemple). D'un autre côté, le réchauffement des températures l'hiver peut faire baisser l'utilisation de chauffage.

En termes de production d'énergie, se pose la question de la disponibilité de l'eau pour la production d'hydroélectricité¹⁶ (voir 9.3.2, p88).

9.4 CONCLUSIONS

On retiendra les éléments suivants :

- **En termes de phénomènes climatique :**
 - Une augmentation des températures à prévoir en effet, avec notamment une diminution du nombre de jours de gel
 - Une variabilité des précipitations interannuelle observée, mais pour laquelle il est difficile de tirer une tendance
- **En termes d'enjeux :**
 - Une pression sur la ressource en eau : une demande croissante en période d'étiage, aggravée par l'utilisation de la neige de culture. Une situation critique : la station des Gets s'est trouvée en défaut d'approvisionnement en plein cœur de la saison touristique → une **réflexion serait à mener à l'échelle du territoire sur la gestion de**

¹⁶ Pour rappel, malgré nos sollicitations, nous n'avons pu rencontrer EDF.

l'eau dans un contexte de changement climatique pour approfondir le travail déjà mené dans le cadre du contrat de rivière

- Santé : Développement de nouveaux pathogènes (comme les tiques par exemple) et un enjeu de la qualité de l'air insuffisamment étudiée à l'échelle de la vallée (notamment en termes d'ozone)
- Sécurité et risques naturels : des risques de crue (notamment liée à la concomitance fonte de la neige et orages), incendies de forêt (liée à l'évolution de la végétation sur les versants et la sécheresse), des événements venteux et des tempêtes (non étudiés pour le moment), des glissements de terrain
→ une **réflexion sur la gestion de ces risques à approfondir l'échelle de la CCHC**
- Tourisme et diminution de l'enneigement : observé par les résidents, mais les données manquent pour des projections sûres. Un problème d'alternance pluie-neige en plein cœur de l'hiver. → **Une nécessaire réflexion sur l'avenir de l'activité touristique notamment autour des questions de l'enneigement artificiel et de la diversification, vers un autre modèle touristique, voire économique ?**
- Agriculture et sylviculture : un problème de décalage des saisons qui génèrent des impacts sur les pratiques (qui ne sont pas forcément négatifs). Mais aussi des conflits d'usages qui peuvent s'accroître (le développement des VTT qui peuvent concurrencer les pâturages par exemple) et le développement de maladies ou parasites, directement liés au CC → **réflexion sur la place de l'agriculture/sylviculture au sein du territoire et de leur évolution**
- Enfin, le changement climatique peut aussi apparaître comme une opportunité pour aller vers un autre modèle de développement du territoire, avec l'accent mis sur le maintien de populations permanentes tout au long de l'année, en s'appuyant sur le développement de la filière bois, d'espaces de co-working, du lien entre producteurs locaux et géopark.

10 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE POUR LE PARC NATUREL DU MASSIF DES BAUGES

10.1 INTRODUCTION

L'objectif de cette partie est de faire un bilan des observations et des projections sur les effets du changement climatique à l'échelle du PNR des Bauges.

En terme d'observations climatiques, nous n'avons pas connaissance de données spécifiques à l'échelle des Bauges, nous utiliserons donc pour cela des données issues de la fiche thématique de l'ORECC sur la CA de Chambéry et la CC Cœur des Bauges (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018).

En ce qui concerne les projections, nous nous basons sur une étude menée par le Centre national de recherches météorologiques (CNRM, Météo-France/CNRS associé à l'Université de Toulouse et l'Université Grenoble Alpes concernant le Centre d'études de la neige) et l'équipe ETNA de l'Irstea à Grenoble. Cette étude avait pour objectif d'apporter de nouvelles projections concernant la neige à moyenne altitude dans le massif alpin nord. Les chercheurs se sont appuyés pour cela sur les projections climatiques mondiales de dernière génération (CMIP5) qui ont alimenté un ensemble de modèles régionaux de climat dans le cadre du programme EUROCORDEX. Cet ensemble de projections climatiques a été ajusté pour être utilisé pour les montagnes françaises en utilisant la méthode ADAMONT développée au CNRM, puis a alimenté le modèle Crocus d'évolution du manteau neigeux. (Verfaillie et al., 2017).

10.2 LES EFFETS DU CHANGEMENTS CLIMATIQUE SUR LE PNR DU MASSIF DES BAUGES

10.2.1 UN RÉCHAUFFEMENT GLOBAL

Un des effets principaux du changement climatique est la hausse globale des températures.

Dans la fiche élaborée par l'ORECC sur les Bauges, la station météorologique de référence pour les températures est celle de Cran-Gevrier, située à 426m d'altitude et représentative du climat du territoire. Les relevés qui y sont effectués depuis 1945 soulignent un réchauffement moyen de 1,7° (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018).

Comme le montre la Figure 12, on observe également le début du phénomène de réchauffement observé depuis 1988 : la plupart des années ont enregistré des températures au-dessus des moyennes et les records de chaleur sont battus régulièrement.

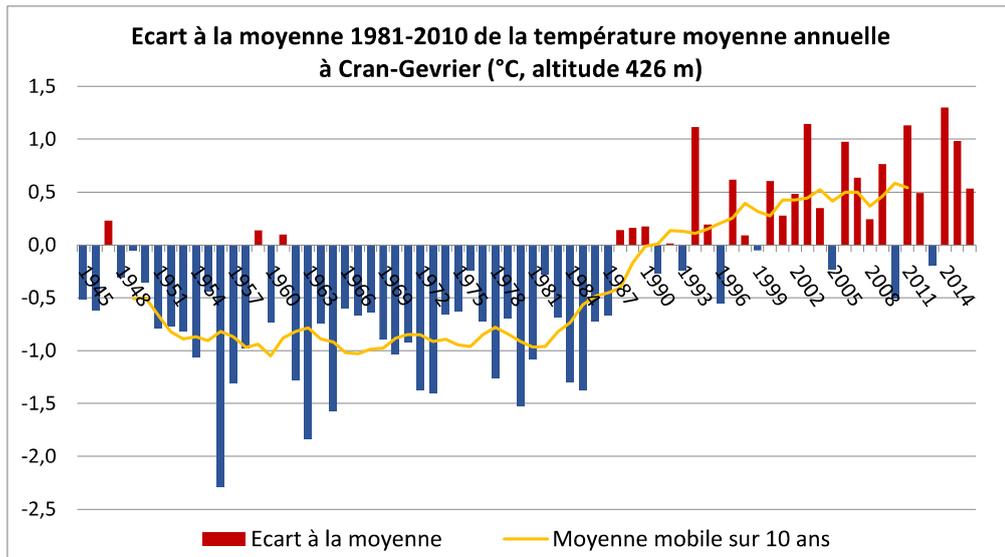


FIGURE 12 : PROJECTION DE L'ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES HIVERNALES ENTRE DÉCEMBRE ET AVRIL DANS LES BAUGES (À 600, 1200 ET 2100M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)

Hiver	+1,6°C
Printemps	+1,6°C
Été	+2,4°C
Automne	+1,2°C
Moyenne annuelle	+1,7°C

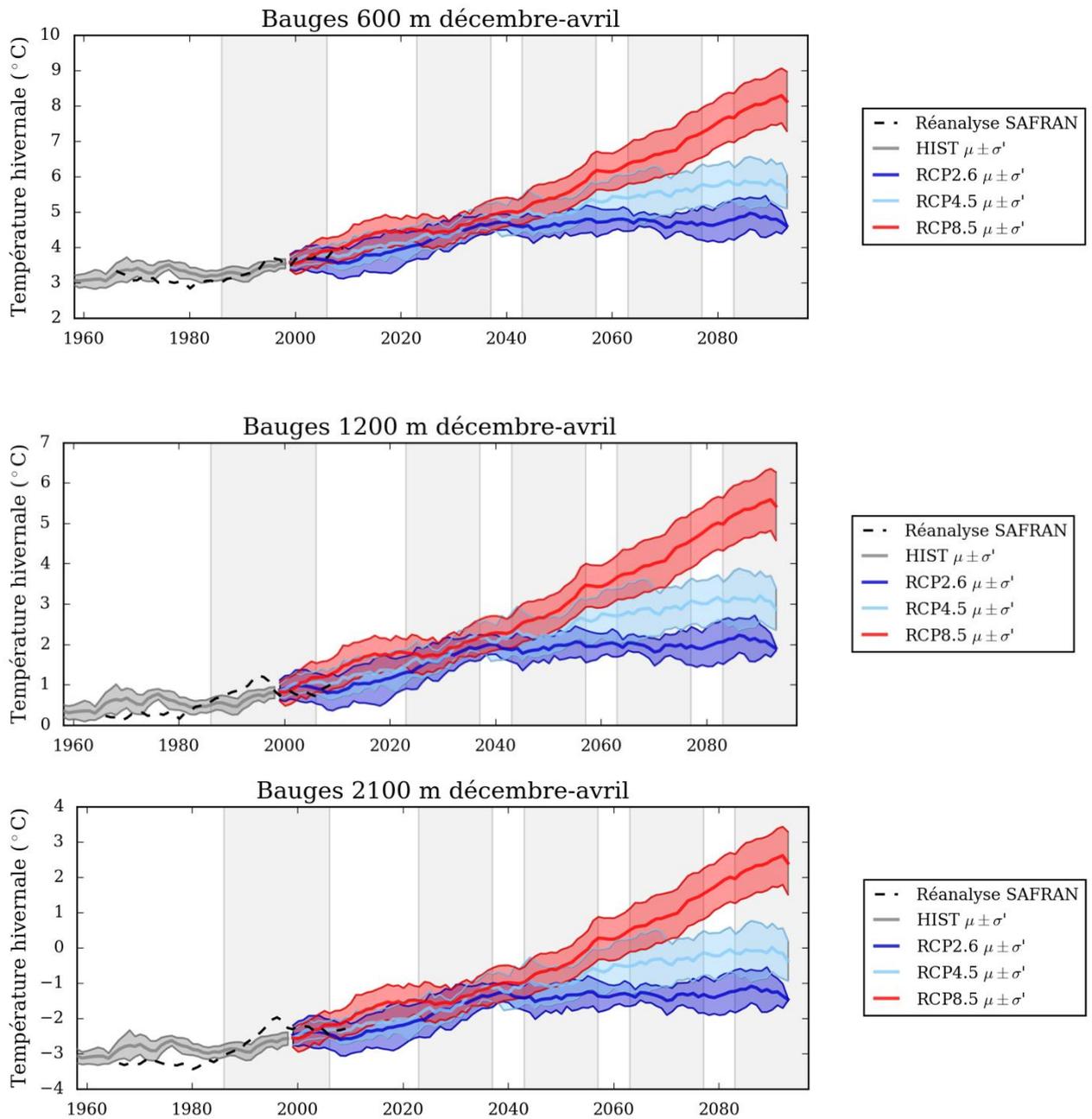
TABLEAU 3 : ÉVOLUTION DES TEMPÉRATURES MOYENNES À CRAN-GEVRIER ENTRE 1945 ET 2016 (426M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)

On note un réchauffement estival plus marqué (+2,4°) que les autres saisons, comme le montre le tableau 3.

Les variations interannuelles de la température sont importantes et vont le demeurer dans les prochaines décennies. Néanmoins, les projections sur le long terme en Auvergne-Rhône-Alpes annoncent une poursuite de la tendance déjà observée de réchauffement jusqu'aux années 2050, quel que soit le scénario. Sur la seconde moitié du XXI^e siècle, l'évolution de la température moyenne annuelle diffère selon le scénario d'évolution des émissions de gaz à effet de serre considéré.

Selon les projections (voir Figure 13), le réchauffement des températures en hiver va s'accroître dans les Bauges, quelles que soient les altitudes (600, 1200 ou 2100m) : de +1 à +6°C selon les scénarii envisagés .

FIGURE 13 : PROJECTIONS DES TEMPÉRATURES HIVERNALES MOYENNES DANS LES BAUGES À 600, 1200 ET 2100M (VERFAILLIE ET AL., 2017)



10.2.2 UN NOMBRE DE JOURS DE GEL EN BAISSÉ

Dans son profil climat territorial, l'ORECC (2018) utilise la station de mesure de Thônes (630m) comme référence pour le nombre de jours de gel. Les observations qui y sont faites montrent une baisse de 20,1 jours entre 1957-1986 et 1987-2016 (voir Figure 14).

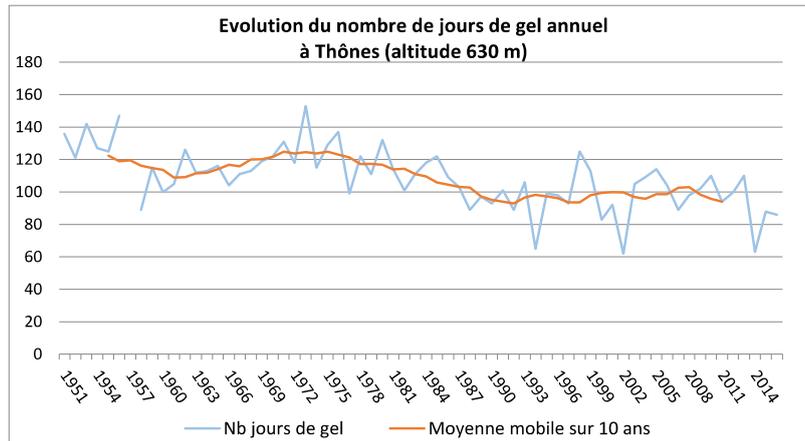


FIGURE 14 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE JOURS DE GEL PAR AN À THÔNES (1951-2016 - ALTITUDE 630 M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)

Comme le montrent le Figure 15 et le Tableau 4, la baisse la plus forte des jours de gel s’observe au printemps.

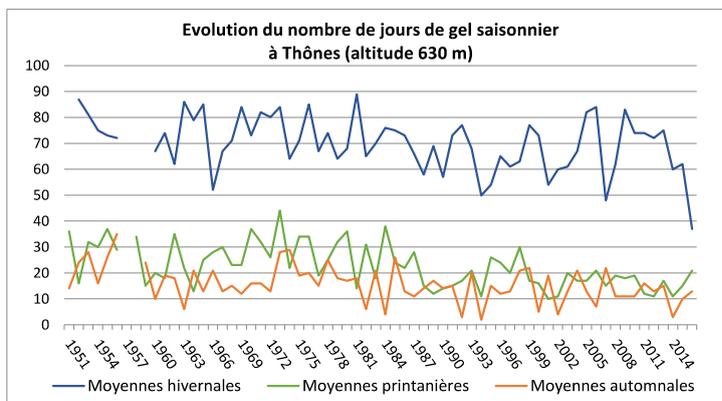


FIGURE 15 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE JOURS DE GEL SAISONNIER À THÔNES (ALTITUDE 630) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)

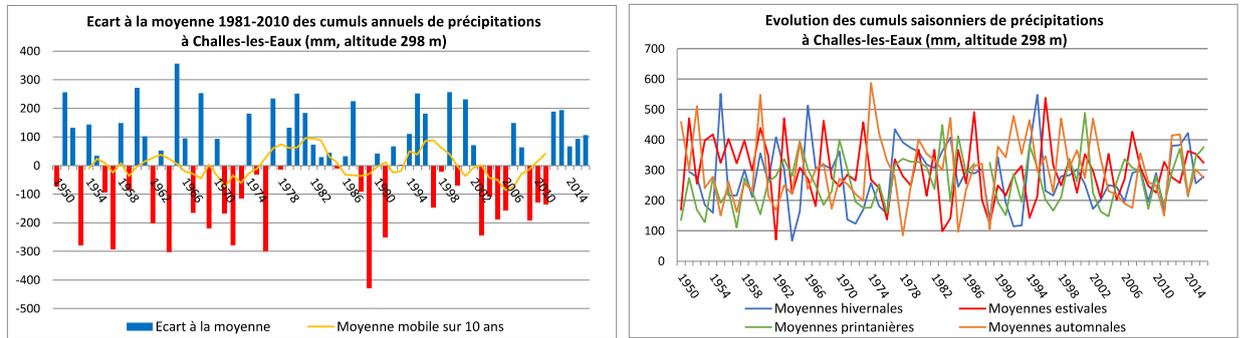
Hiver	-8,1j
Printemps	-9,4j
Été	+0,0j
Automne	-4,1
Moyenne annuelle	-20,1j

TABLEAU 4 : ÉVOLUTION DU NOMBRE DE JOURS DE GEL À THÔNES (630M) PAR SAISON ENTRE 1957-1986 ET 1987-2016 (D’APRÈS ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)

10.2.3 DES PRÉCIPITATIONS TRÈS VARIABLES

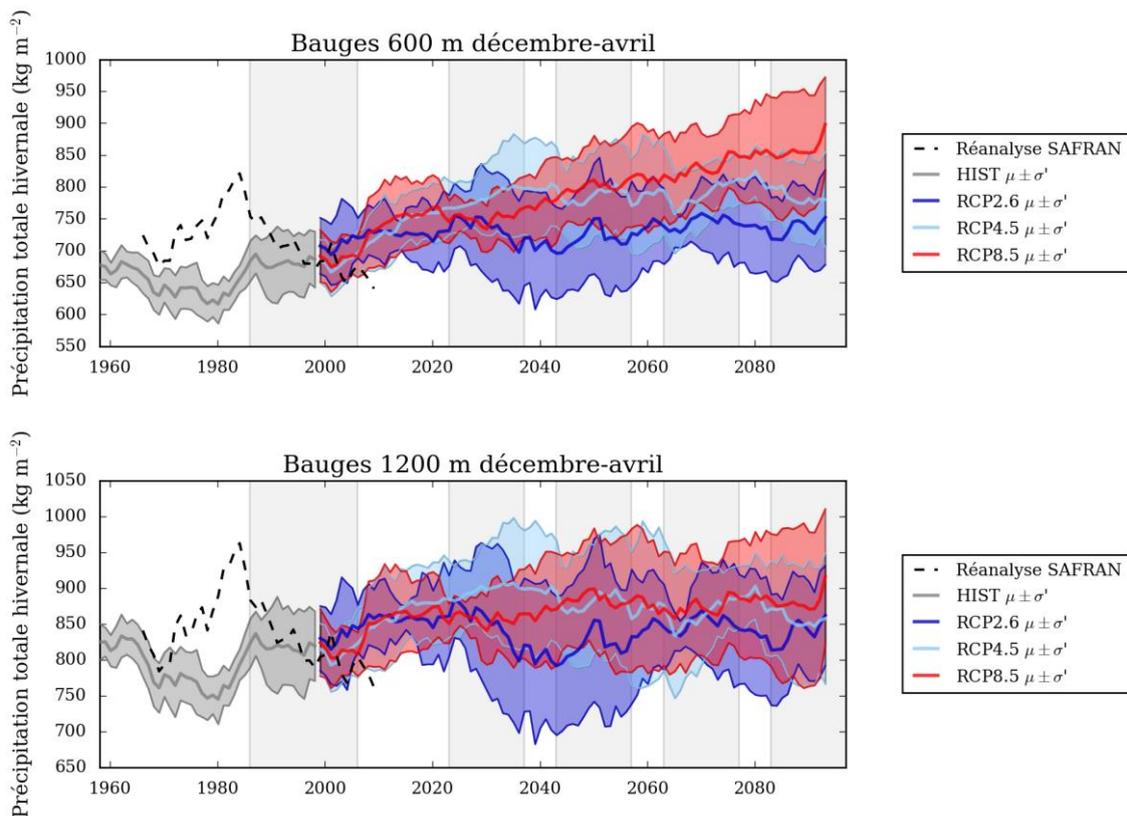
Pour les précipitations, l’ORECC se base sur les données relevées à la station météorologique de Challes-Eaux. La Figure 16 montre une grande variabilité d’une année sur l’autre qui rend difficile l’émergence tendance nette sur l’évolution des précipitations depuis 1950. Les incertitudes sont fortes quant à l’évolution future de ces précipitations (ORECC Auvergne-Rhône-Alpes, 2018)

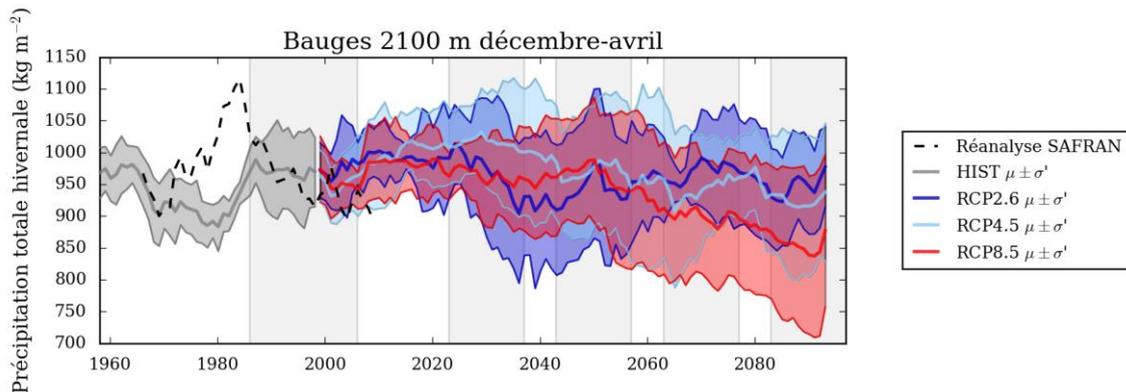
FIGURE 16 : ÉVOLUTION DES CUMULS ANNUELS ET SAISONNIERS DE PRÉCIPITATIONS À CHALLES-LES-EAUX (1950-2016 – ALTITUDE 298M) (ORECC AUVERGNE-RHÔNE-ALPES, 2018)



Lorsqu'on s'intéresse plus spécifiquement aux précipitations hivernales, les projections pour les Bauges ne permettent pas non plus de définir de grandes tendances pour la fin du siècle (voir Figure 17).

FIGURE 17 : PROJECTIONS DES PRÉCIPITATIONS TOTALES HIVERNALES DANS LES BAUGES À 600, 1200 ET 2100M (VERFAILLIE ET AL., 2017)



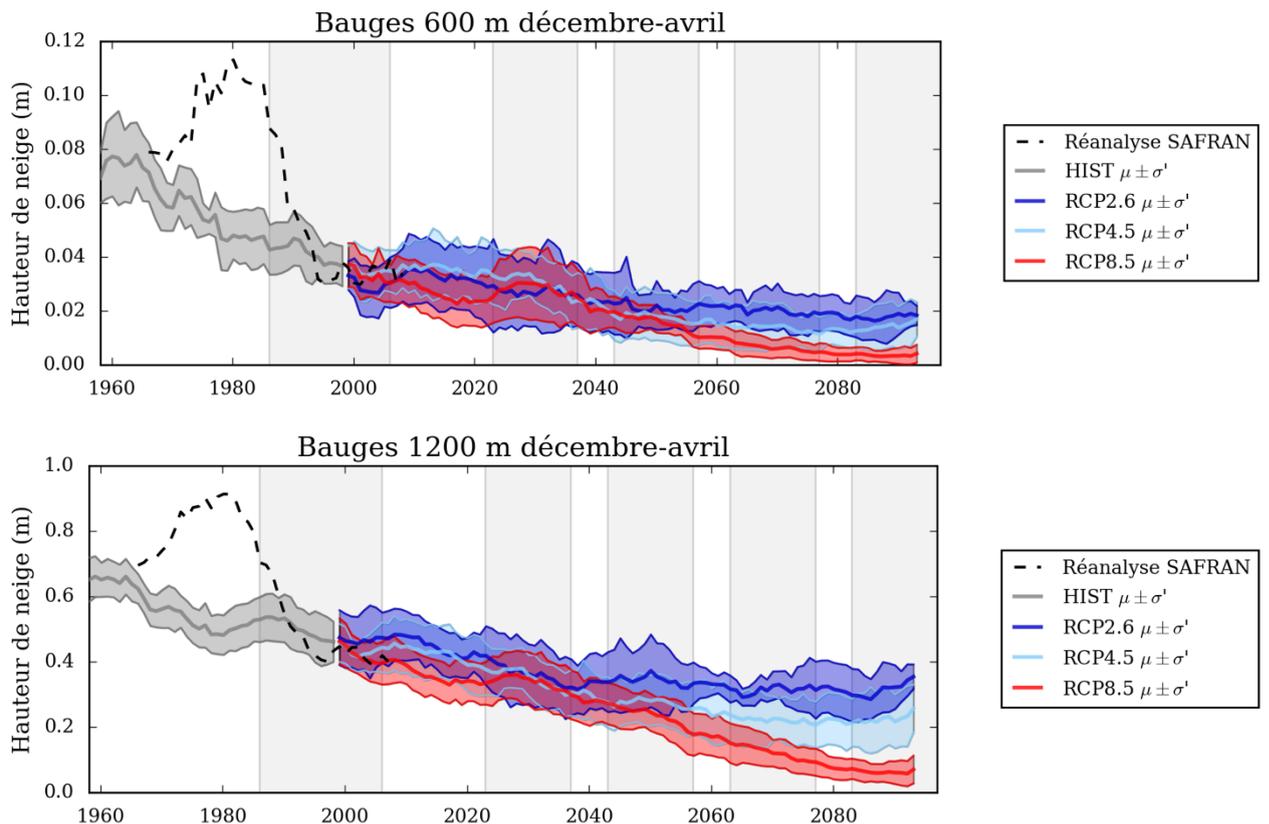


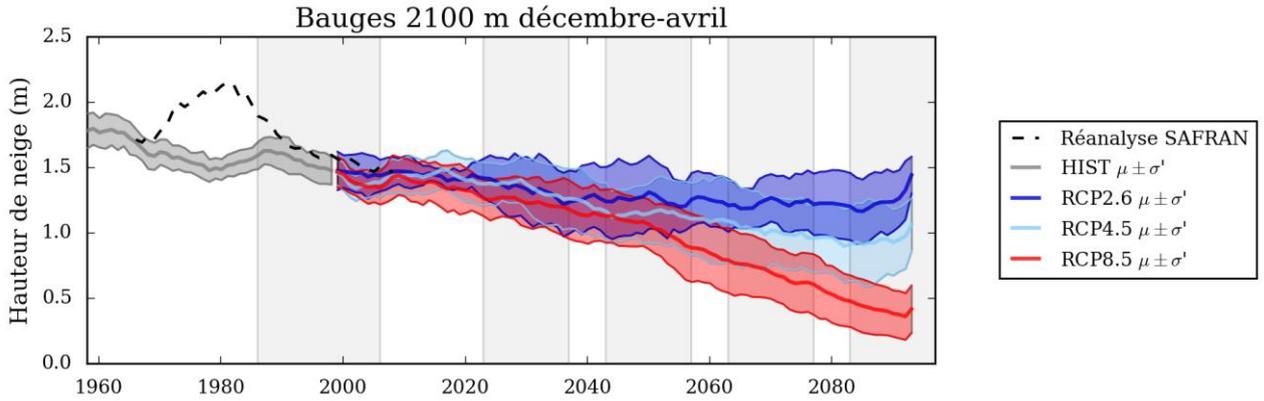
10.2.4 UNE BAISSÉ DE L'ENNEIGEMENT

Les participants du groupe tourisme de l'atelier de janvier 2018 notent une baisse de l'enneigement. Ces éléments ne peuvent pas être confirmés par des observations locales.

Cette tendance à la baisse observée globalement depuis les années 1960 est intégrée dans la projection visant à simuler les tendances en termes d'enneigement sur les Bauges jusqu'à la fin du siècle. Dans le pire scénario, on note une quasi disparition de celle-ci jusqu'à 1 200 m (scénario RCP8.5) (voir ci-dessous).

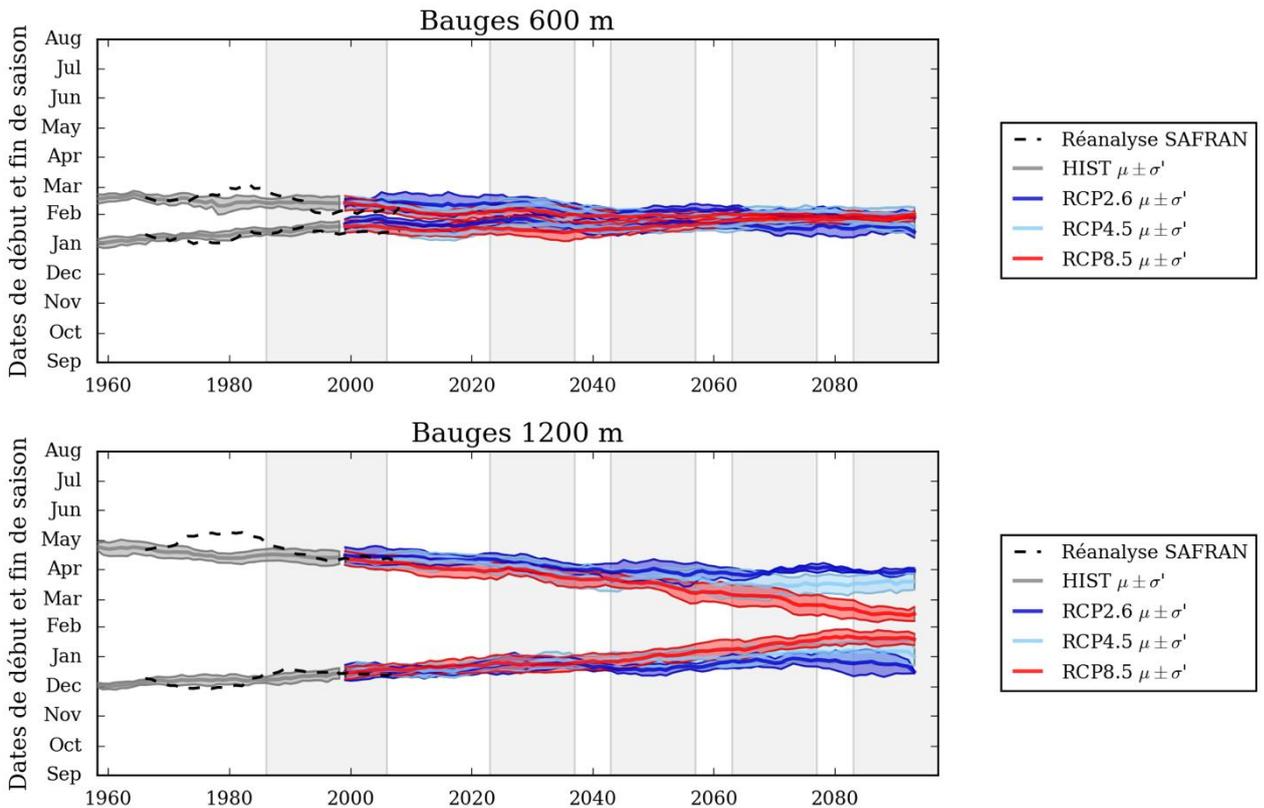
FIGURE 18 : PROJECTION DE LA HAUTEUR DE NEIGE DANS LES BAUGES À 600, 1200 ET 2100 M

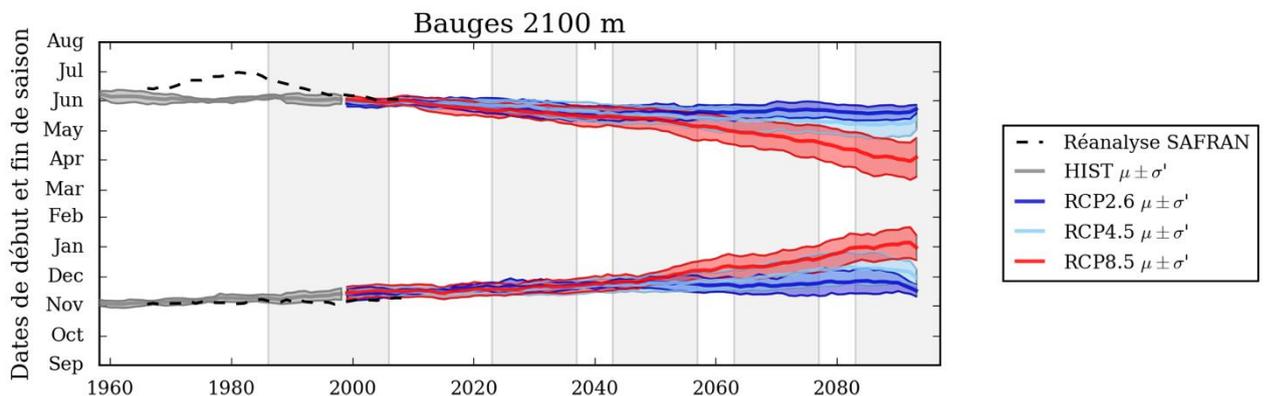




Ce constat est confirmé par les projections sur les dates de début et de fin de saison de l'enneigement, toujours issues de l'étude du CEN, qui montrent un clair raccourcissement de celle-ci. On note cependant des différences selon l'altitude : si à 600 mètres, les projections présentent une saison résumée au mois de février pour 2080, l'impact est plus modéré à 2100 mètres (selon les scénarios de décembre à juin pour le plus optimiste ou de janvier à avril pour le RCP8,5).

FIGURE 19 : PROJECTION DU DÉBUT ET DE FIN DE L'ENNEIGEMENT SUR LES BAUGES (VERFAILLIE ET AL., 2017)





10.2.5 DES DÉBITS D'EAU PLUS FAIBLES DANS LE CHÉRAN

On observe une baisse de -13% des débits moyens du Chéran et de -25% des débits printaniers entre avant et après 1988. Cela est dû à plusieurs facteurs : l'augmentation des températures et de l'ETP (évapotranspiration), la fonte plus rapide d'un manteau neigeux de moins en moins conséquent (provoquant en plus une avancée du pic de crue d'avril à mars), le tout couplé à un départ de la végétation plus précoce (Chaix, 2016).

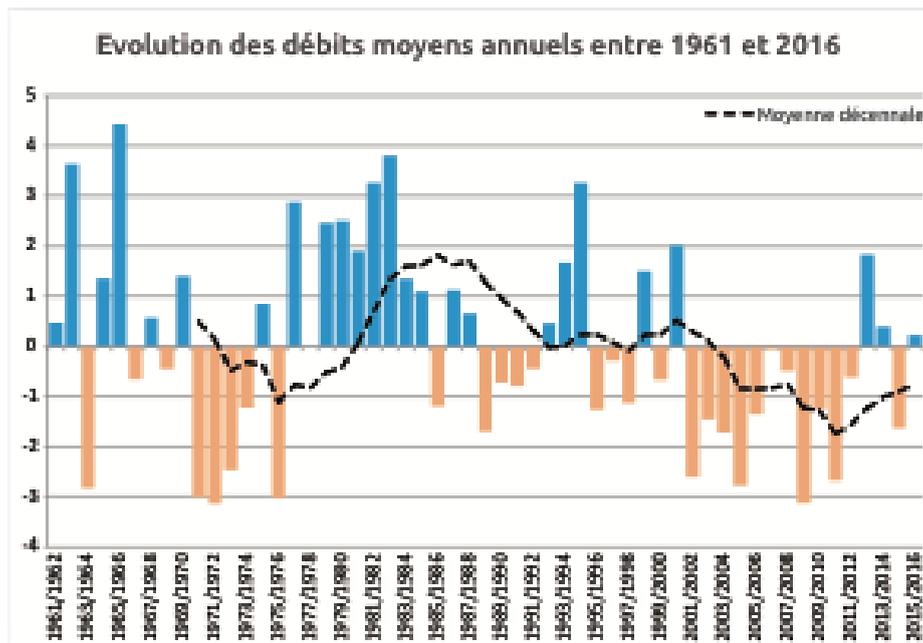


FIGURE 20 : ÉCARTS DES DÉBITS ANNUELS (OCT. SEPT) MOYENS DU CHÉRAN EN M3/S PAR RAPPORT À LA MOYENNE 1961-2016 (SOURCE : DREAL, HYDRO - MEDDE/DE, TRAITEMENT ASADAC-MDP.) (CHAIX, 2016)

10.2.6 EN CONCLUSIONS

On peut retenir les éléments suivants des informations présentées sur les effets du changement climatique sur le territoire :

- **Un manque de données très localisées** (les rapports de l'ORECC reposent sur les stations de Cran-Gevrier, Thônes, Challes les Eaux)
- **De fortes incertitudes sur l'évolution des précipitations**
- Une baisse de l'enneigement (dans le pire scénario des projections, une quasi disparition de celle-ci jusqu'à 1 200 m) et une réduction de la saison
- Une réduction du débit du Chéran

10.3 LE RESSENTI DES ACTEURS DU TERRITOIRE PAR RAPPORT AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Pour cette partie, nous nous basons sur un atelier organisé par le Parc le 24 janvier 2018 regroupant des acteurs du territoire et des chargés de mission du Parc.

L'objectif était de définir les orientations stratégiques du projet.

L'organisation a été la suivante :

- Rappel des enjeux du CC dans les Alpes et les Bauges en plénière
- Réflexion en 4 sous-groupes (reprenant les 4 secteurs de vulnérabilité identifiés dans le PCET (PNR du Massif des Bauges, 2014b)) pour faire remonter 1) les impacts déjà constatés, 2) les impacts projetés et 3) les actions d'adaptation déjà mises en œuvre :
 - Agriculture
 - Forêt
 - Tourisme
 - Biodiversité / ressources naturelles / risques
- Restitution & intervention de Stéphane Labranche en plénière

Nous présentons ici la restitution des ateliers.

10.3.1 ATELIER RISQUES ET BIODIVERSITÉ

Le RTM constate que les avalanches sont plus fréquentes et descendent de plus en plus bas dans la vallée. Ce phénomène est, pour les acteurs présents, inquiétants, même s'il est bien connu et suivi.

Les acteurs présents lors de l'atelier font mention d'une augmentation des feux de forêt et identifie cela comme une thématique émergente.

La baisse du débit du Chéran est un facteur d'inquiétude pour les acteurs présents. Ils notent également que la période d'étiage est de plus en plus longue (125 jours dans l'année en dessous du niveau d'étiage).

Les idées fortes issues de l'atelier sont les suivantes :

- Nécessité de mieux comprendre les phénomènes, avec un regard certes global mais également local car les Bauges présentent des spécificités territoriales. Il s'agirait de mettre en place des

dispositifs de suivi locaux sur l'exemple du Syndicat Mixte Interdépartemental d'Aménagement du Chéran ; la connaissance locale permet une réponse adaptée, notamment dans le champ des aménagements.

- Une fois les données acquises, il faudrait se donner les moyens d'analyse et de structuration collective.
- Sensibilisation, partage d'informations, transversalité, étude sociologique à mener pour connaître les perceptions du grand public sur ces phénomènes.
- La vision conservatrice de la biodiversité est à repositionner au regard du changement climatique, des enjeux à redéfinir, des politiques publiques à faire évoluer avec. La stratégie biodiversité du Parc dans sa révision doit s'inscrire dans cette vision évolutive de la biodiversité.
- Nous devons questionner notre propre capacité à s'adapter
- Des incertitudes existent sur les choix à faire dans cette période de transition. Il faut tester, le territoire du Parc est certainement adapté pour mener ces expérimentations.

10.3.2 ATELIER AGRICULTURE

10.3.2.1 LES EFFETS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les constats sur l'agriculture issus de l'atelier sont les suivants :

	Effets sur les rythmes	Effets sur l'espace
Positifs	<p>Précocité de la végétation : permet plus de coupes.</p> <p>Résilience : élevage extensif. Effet limité des changements de rythme</p> <p>Sur la viticulture : quantité de raisin et qualité du vin</p>	<p>Les zones humides deviennent accessibles sans effet mécanique : ils s'assèchent naturellement</p>
Négatifs	<p>Augmentation du coût de production</p> <p>Gel tardif, grêle</p> <p>Parasites</p> <p>Cycle végétatif plus court :</p> <p>Bascule rapide en termes de qualité</p> <p>Pression sur l'activité</p> <p>Demande de technicité accrue</p>	<p>Concurrence ligneuse – autres usages</p> <p>Remontée de la forêt : qualité paysagère</p> <p>Accès à l'eau et conflits d'usage</p> <p>Concurrence avec le développement de l'habitat</p> <p>Adaptation, gestion des pratiques fourragères</p>

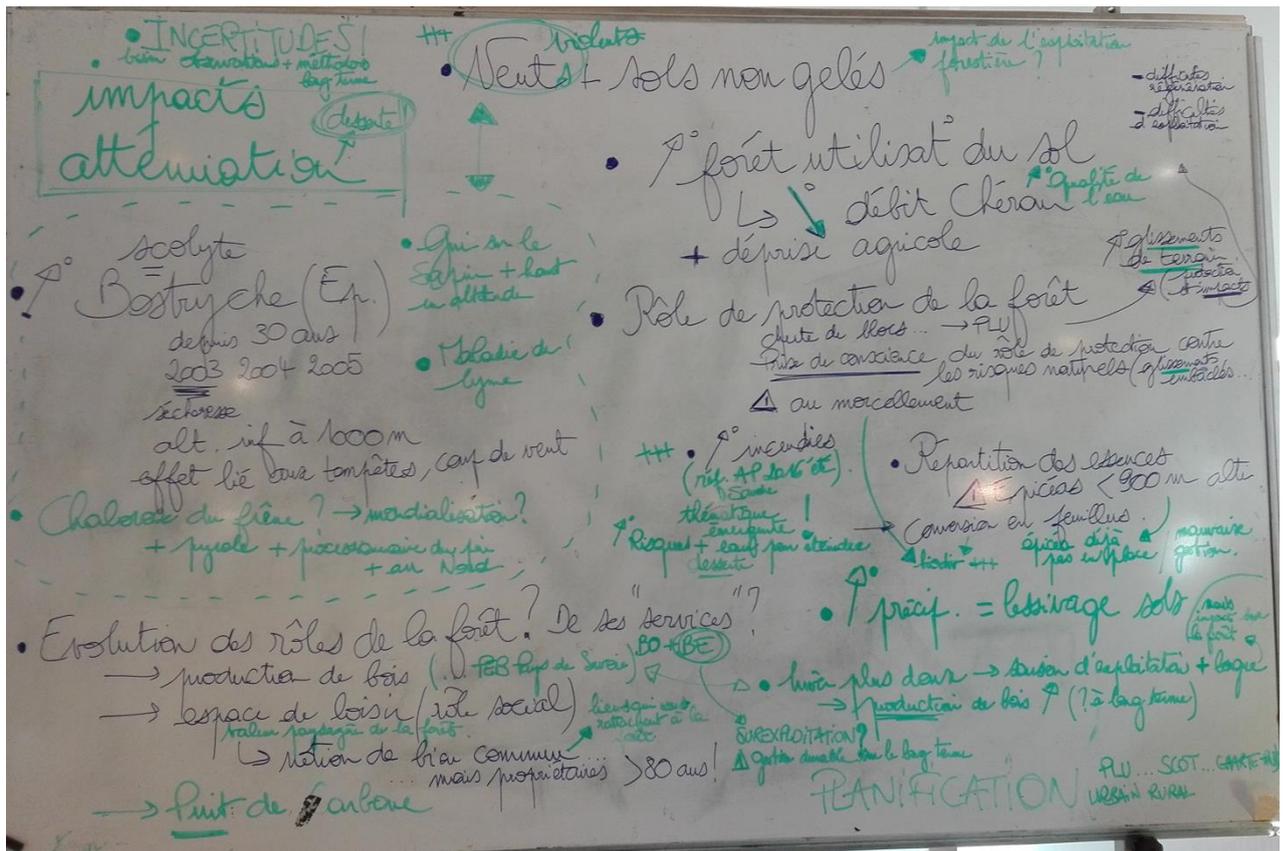
10.3.2.2 DES ACTIONS À METTRE EN ŒUVRE

Des propositions d'action ont été faites sur la base de ces constats :

- Planification :
 - Préserver les terres agricoles
 - Limiter le mitage
 - Regroupement des terres pour une même exploitation

- Favoriser le changement des pratiques vers une meilleure adaptation au changement climatique
- Évaluation de la faisabilité
 - Volonté politique
 - Soutien financier
 - Problème de changement de culture de transmission patrimoniale (vente de terrain agricole)
- Accompagner la transition :
- Développement des circuits courts (incitation dans la charte)
 - Décisions locales : cantine...
 - Faire connaître les associations et initiatives qui vont dans ce sens
 - Incitations au développement d'accueils à la ferme (nouvelles compétences et emplois)
 - Décisions politiques actuelles dans ce sens
- Formation :
 - Dans les écoles d'agriculture
 - Dans les maisons familiales
 - Sensibilisation dans les écoles, collèges, lycées
- Recours aux énergies renouvelables
- Gestion de la ressource en eau / partage

10.3.3 ATELIER FORÊT



Les acteurs de l'atelier forêt évoquent une remontée des essences : l'épicéa remonte au-dessus de 900 m et est progressivement remplacé par des feuillus. Par ailleurs, les choix de plantation faits il y a quelques années n'apparaissent pas forcément comme très adaptés du fait du changement climatique. On observe ainsi plus de chablis qui déstabilisent le sol et une augmentation de zones ouvertes qui favorisent l'augmentation des phénomènes érosifs.

Ils soulignent l'accroissement de la vulnérabilité de la forêt du fait du développement de maladies et de pathogènes : l'augmentation depuis 30 ans du bostryche (un des scolytes les plus répandus) du fait notamment des sécheresses à répétition (2003, 2004, 2005), la chalarose du frêne, la processionnaire du pin, le gui sur les sapins plus haut en altitude. Parallèlement, on observe une augmentation des tiques.

Un effet positif du changement climatique notable est lié au radoucissement des hivers qui permet une saison d'exploitation plus longue et donc une augmentation de la production. Mais, quel impact cela peut-il avoir à terme sur la forêt ?

Ils en arrivent à poser la question de l'évolution des services écosystémiques de la forêt du fait de ces effets : production de bois, espace de loisirs, puits de carbone, protection des sols...

10.3.4 ATELIER TOURISME

10.3.4.1 LES IMPACTS ACTUELS :

En ce qui concerne le tourisme hivernal, les acteurs font part d'effets déjà observables : la baisse du chiffre d'affaire des remontées mécaniques et du CA des séjours ski enfants à la semaine.

La station d'Aillon le Jeune est en procédure de sauvegarde : que va-t-elle devenir ainsi que les 350 emplois à terme ?

Il est rappelé qu'il faut différencier les impacts sur le ski alpin et le ski nordique

En ce qui concerne le tourisme d'été, une augmentation de la demande touristique cherchant la fraîcheur (altitude et lacs) est observée.

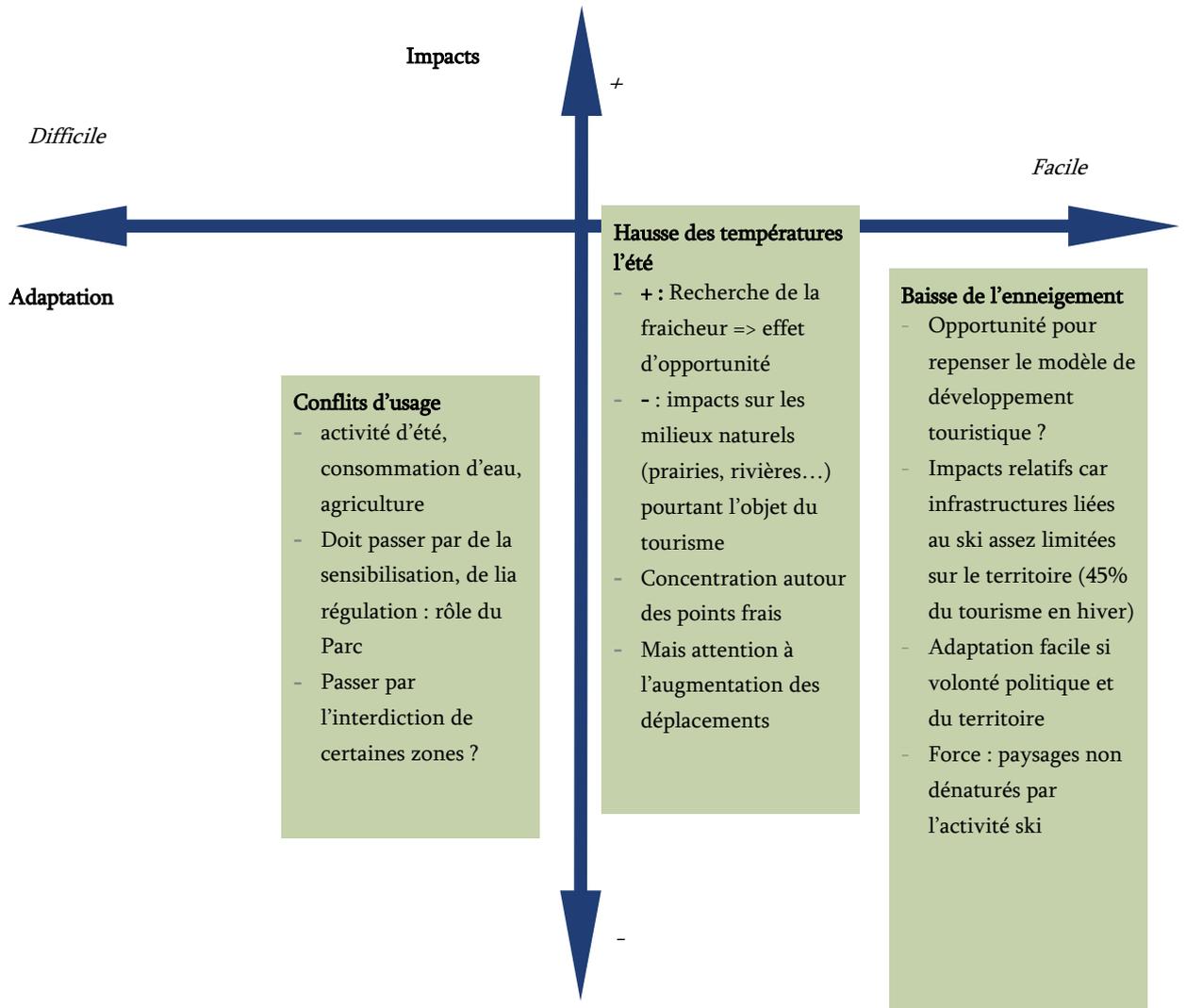
Plus largement, les réservations dans les hébergements sont de plus en plus fonction des conditions météorologiques : les réservations et les annulations sont faites à la dernière minute.

Dans ce cadre, le changement climatique serait-il l'opportunité nécessaire au territoire pour changer de modèle touristique ?

10.3.4.2 SOLUTIONS D'ADAPTATION DÉJÀ MISES EN PLACE :

- Utilisation des enneigeurs (sauf au Margeriaz) :
 - mais qu'en est-il de la température de l'eau au Aillon et à la Feclaz ?
 - Les coûts d'investissement et de fonctionnement sont élevés.
 - Et leur utilisation est limitée par la température qui augmente l'hiver.
- Formation des gîtes d'accueil auprès des touristes sur les questions de CC
- Diversification
 - Pratiques 4 saisons
 - Géopark
 - Attention aux coûts associés à la diversification des activités sportives (par ex. Le chien de traîneau) : ce n'est pas accessible à tous
 - Revendiquer un nouveau positionnement du Aillon basé sur la récréation ?
 - Hébergements : organisation de séminaires... (moins dépendants de la météo)
 - Forces pour la diversification :
 - paysages des Bauges
 - Proximité de grandes agglomérations
 - L'économie touristique est aux mains des communes
 - Faiblesses :
 - Les Bauges ne sont pas forcément associées à une image de montagne
 - L'urbanisme dégradé des stations et des aménagements touristiques (notamment le Aillon)
 - Menaces :
 - Politique régionale et départementale pour développer le ski alpin
 - Point d'attention :
 - Comment optimiser les déplacements associés à une augmentation du nombre de touristes ?
 - Quel impact de l'entrée du territoire dans les agglomérations en termes de gouvernance du tourisme ?
 - Fréquentation des sites touristiques : faut-il mettre en place des seuils de fréquentation pour préserver les milieux ?
- Question : l'activité touristique est-elle une activité de complément ou une activité de plein temps sur le territoire ?

10.3.5 HIÉRARCHISATION DES EFFETS :



10.3.6 CONCLUSIONS

L'atelier a été intéressant pour lancer une première réflexion, et particulièrement en termes de processus :

- Il a favorisé le croisement de regards des acteurs sur les 4 thèmes
- Il a permis de sensibiliser de nouveau aux questions climatiques et de rappeler les enjeux au niveau local
- Il a lancé la réflexion du territoire sur la question de l'adaptation.

Cependant, ce contenu nécessiterait d'être complété avec une approche plus fine, par le biais notamment d'entretiens individuels permettant de faire émerger les enjeux du territoire au regard du changement climatique.

11 LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE HOMOGÈNE DE PINEROLO

11.1 INTRODUCTION

L'analyse des impacts du changement climatique dans la région de Pinerolo a été réalisée selon une double approche. D'une part, les études et recherches existantes qui étudient et surveillent le changement climatique ont été passées en revue, en se référant au territoire de Pinerolo et - en second lieu - à une échelle plus grande (provinciale et régionale). D'autre part, un questionnaire a été soumis aux administrateurs municipaux et aux techniciens de la Ville Métropolitaine de Turin, dans le but de faire ressortir la perception du changement climatique, les pratiques d'adaptation et les obstacles dans l'aménagement du territoire de la zone d'étude.

La combinaison de ces deux approches a permis d'obtenir un cadre qualitatif et quantitatif qui constituera la base pour le développement des actions ultérieures prévues par le projet dans la zone d'étude de Pinerolo. Les paragraphes suivants résument les résultats de l'analyse, d'abord en fonction des études et des recherches existantes, puis en présentant les points de vue des techniciens et des administrateurs locaux.

11.2 ÉTUDES ET RECHERCHES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LA ZONE DU PINEROLO

L'état de la littérature sur l'impact du changement climatique dans la Zone Homogène de Pinerolo souligne le manque d'études et de recherches sur le sujet dans ce domaine. L'étude qui décrit plus en détail la zone est *L'état de l'Environnement de Pinerolo* (Arpa Piemonte, 2013). Le document analyse les différents aspects de l'état environnemental du territoire, avec des références également au climat et à son impact sur la santé humaine, en ce qui concerne, par exemple, les vagues de chaleur.

Ensuite, il y a des études se référant à des zones territoriales d'analyse plus larges, dans lesquelles se situe la zone de Pinerolo. En particulier, *Changement climatique et gouvernance territoriale dans la province de Turin* (Società Meteorologica Subalpina e Provincia di Torino, 2008) donne un aperçu du problème à l'échelle de la Ville Métropolitaine, en tenant compte à la fois des indicateurs climatiques et des impacts sur les flux touristiques, le système de peuplement, les risques naturels, les forêts, l'agriculture, la production d'énergie hydroélectrique, les flux d'eau et la santé humaine. L'étude propose également une analyse de ceux qui pourraient être les scénarios futurs dans ce domaine.

Au niveau régional, plusieurs études ont été réalisées : *Le Piémont dans le changement climatique - Observations passées, impacts présents et stratégies futures* (Arpa Piemonte, 2007) ; *Cinquante ans de données météorologiques et climatiques dans le Piémont - Température et précipitations quotidiennes (1958-2009) - Intégration du territoire, analyse statistique et comparaisons historiques* (Arpa Piemonte, 2011a) et *Le changement climatique : les activités d'Arpa Piemonte sur l'état, les impacts et les réponses* (Arpa Piemonte, 2011b). Le portail interactif de l'Arpa Piemonte relatif au *Rapport sur l'état de l'environnement en Piémont 2017* fait également partie de ce cadre.

Il existe également une étude réalisée spécifiquement sur les zones de montagne régionales qui fournit des données à large spectre thématique : *Le changement climatique dans les montagnes du Piémont* (Società Meteorologica Subalpina e Regione Piemonte, 2008).

Dans *Le climat de Turin*, Di Napoli & Mercalli (2008) retracent une analyse climatique approfondie de la capitale régionale et décrivent en partie son évolution récente due au changement climatique. La série

historique de mesures thermométriques quotidiennes effectuées dans la ville de Turin depuis 1753, l'une des plus longues et des plus complètes d'Italie et du monde, le confirme.

Un document plus sectoriel est, au contraire, *La chute de neige naturelle des Alpes piémontaises et les conditions météorologiques favorables à la production de neige programmée* (Società Meteorologica Subalpina e Arpa Piemonte, 2008), qui se concentre sur le problème de la rareté croissante des chutes de neige.

Enfin, une étude menée par le Département des Sciences Naturelles de l'Université de Turin, *Contribution à l'étude du changement climatique dans les Alpes occidentales : le cas de la Vallée de Maira* (Fратиanni, Brunatti, Acquaootta, & Cordola, 2010), qui propose une analyse des preuves du changement climatique dans une vallée non loin de la Zone Homogène de Pinerolo. Il pourrait s'agir d'un modèle pour l'élaboration d'une étude climatique dans la zone du projet.

11.2.1 INDICATEURS CLIMATIQUES

Les études analysées ont permis, tout d'abord, d'esquisser l'évolution des paramètres climatiques dans la région de Pinerolo. Parmi ceux-ci, la température est certainement l'un des indicateurs qui met le mieux en évidence les changements induits par le changement climatique au cours des dernières décennies. Si, en fait, la tendance au réchauffement est en cours depuis la fin du XIXe siècle, depuis la fin des années 1980, le taux de croissance des températures moyennes annuelles et saisonnières a augmenté de façon significative. Pour la ville de Turin, il y a une augmentation de l'ordre de 2°C de la température moyenne annuelle sur un siècle (Arpa Piemonte, 2008). Les tendances régionales moyennes, en revanche, indiquent une augmentation de 1,1°C des températures annuelles moyennes et identifient l'automne comme la saison avec les plus faibles augmentations (Società Meteorologica Subalpina e Regione Piemonte, 2008).

Afin de vérifier l'alignement du climat de la région de Pinerolo avec les tendances régionales, les séries historiques de températures enregistrées à la station météorologique de Luserna San Giovanni, située à 475 m d'altitude et active depuis 1988, ont été analysées. Les données ont été obtenues à partir de la base de données d'Arpa Piemonte et la station a été choisie parce que, parmi celles situées dans la zone analysée, c'est celle qui présente la série la plus longue et la plus complète. Les données de température annuelle moyenne ont été analysées au moyen d'une régression linéaire (figure 11.1), qui a montré une augmentation annuelle d'environ 0,08°C. Ce chiffre étonnamment élevé doit cependant être lu en sachant que la période prise en considération (1989-2017) est sujette à d'importantes fluctuations annuelles, ainsi qu'à des fluctuations relativement courtes et limitées aux trente dernières années, c'est-à-dire celles qui sont affectées par la plus grande variation de température, même au niveau mondial. Les années 1997, 1999, 2001 et 2004 n'ont pas été incluses dans l'analyse en raison d'un manque de données suffisantes.

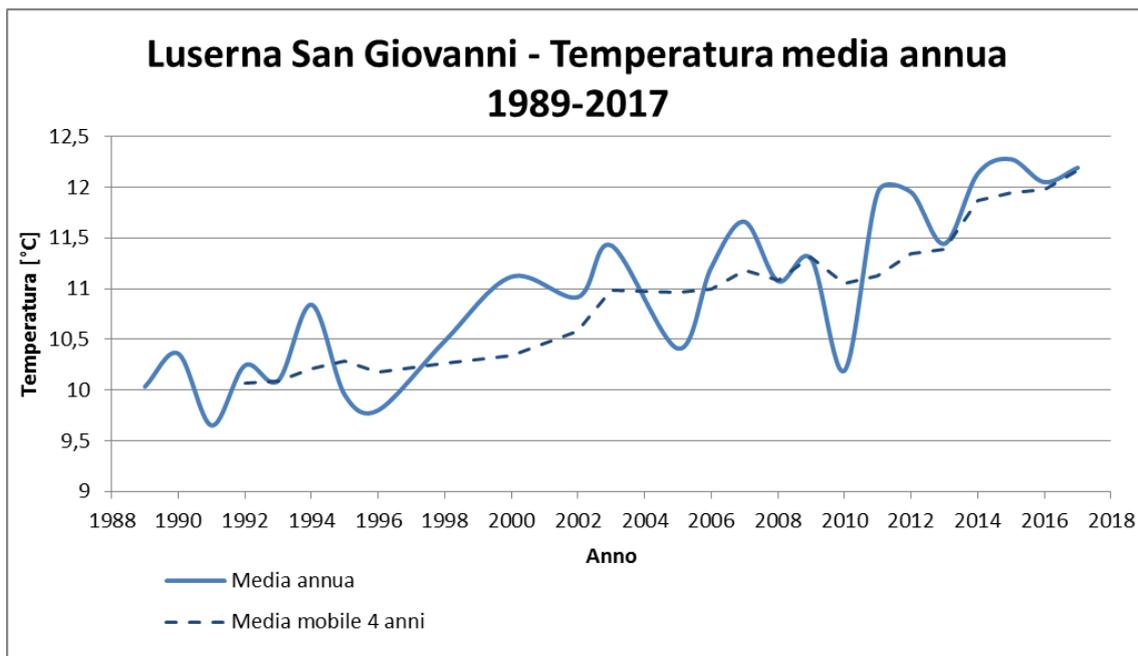


FIGURE 11.1. TENDANCE MOYENNE ANNUELLE DE LA TEMPÉRATURE À LA STATION DE LUSERNA SAN GIOVANNI ENTRE 1989 ET 2017.

En ce qui concerne les zones de montagne, les températures minimales varient le plus : ceci est dû à la fréquence plus faible des gelées fortes et au retard dans le début des gelées d'automne, ainsi qu'à une fin précoce des gelées de printemps (SMS, Région Piémont, 2008). Cette tendance a une influence significative sur la quantité moyenne de chûtes de neige fraîche, en particulier en dessous de 1000-1500 m d'altitude (Arpa Piemonte, 2008). La réduction de l'épaisseur moyenne du manteau neigeux est encore plus importante, du fait de la fonte liée aux températures plus élevées de l'hiver et du printemps : entre 1990 et 2007, il a été divisé par deux, sur presque toutes les zones de montagne de la province (tableau 11.1 ; pas de données spécifiques sur la zone de Pinerolo), par rapport à la période 1961-1989 (Arpa Piemonte, 2008).

Riepilogo delle variazioni di innevamento osservate sulle Alpi piemontesi tra i periodi 1961-1989 e 1990-2007				
Località	Quota (m)	Totale annuo neve fresca	Media annua spessore neve al suolo	Numero annuo giorni con suolo innevato
Torino	250	-36%	*	*
Cuneo	565	-35%	*	*
Entracque (Valle Gesso, CN)	900	-32%	-54%	-22%
Formazza (Val Formazza, VB)	1280	-31%	-33%	-14%
Balme (Valli di Lanzo, TO)	1440	-31%	-50%	-26%
Lago Saretto (Val Maira, CN)	1540	-18%	-49%	-24%
Ceresole Reale (Valle Orco, TO)	1579	-24%	-48%	-13%
Lago Rochemolles (Val di Susa, TO)	1926	-22%	-46%	-6%
Lago Toggia (Val Formazza, VB)	2200	-10%	-18%	-7%
Lago Valsoera (Valle Orco, TO)	2440	-22%	-45%	-7%
Media		-26%	-43%	-15%

Variazione del numero di giorni con spessore nevoso pari o superiore alle soglie di 10, 40 e 70 cm										
Località	Quota (m)	10 cm			40 cm			70 cm		
		1961-1989	1990-2007	%	1961-1989	1990-2007	%	1961-1989	1990-2007	%
Entracque (Valle Gesso, CN)	900	85	55	-35	47	20	-57	26	7	-73
Formazza (Val Formazza, VB)	1280	147	111	-24	106	74	-30	70	39	-44
Balme (Valli di Lanzo, TO)	1440	134	88	-34	85	39	-54	45	17	-62
Lago Saretto (Val Maira, CN)	1540	139	100	-28	87	48	-45	51	19	-63
Ceresole Reale (Valle Orco, TO)	1579	140	104	-26	97	47	-52	51	20	-61
Lago Rochemolles (Val di Susa, TO)	1926	178	163	-8	141	106	-25	105	55	-48
Lago Toggia (Val Formazza, VB)	2200	239	219	-8	215	193	-10	191	172	-10
Lago Valsoera (Valle Orco, TO)	2440	230	227	-1	187	164	-12	161	118	-27

TABLEAU 11.1. CI-DESSUS : RÉSUMÉ DES VARIATIONS EN POURCENTAGE OBSERVÉES DANS LES TOTAUX ANNUELS DE NEIGE FRAÎCHE, LES MOYENNES ANNUELLES DE L'ÉPAISSEUR DE NEIGE ET LE NOMBRE ANNUEL DE JOURS AVEC DES SOLS ENNEIGÉS AU COURS DE LA PÉRIODE 1990-2007 PAR RAPPORT À LA PÉRIODE PRÉCÉDENTE 1961-1989. CI-DESSOUS : RÉSUMÉ DU NOMBRE ANNUEL DE JOURS OÙ L'ÉPAISSEUR DE NEIGE EST ÉGALE OU SUPÉRIEURE AUX SEUILS DE 10, 40 ET 70 CM POUR LES PÉRIODES 1961-1989 ET 1990-2007, ET VARIATION RELATIVE EN POURCENTAGE.

Les précipitations, contrairement aux températures, ne montrent pas de changements particuliers au niveau régional pour le moment, à l'exception d'une légère tendance à la baisse de l'offre annuelle (Arpa Piemonte, 2017). Cependant, les scénarios futurs développés par le projet "Prudence" pour le sud de la Suisse montrent que, dans le sud des Alpes, les précipitations ne peuvent augmenter qu'en partie en hiver, en raison d'une augmentation probable des régimes de vent entre le sud-ouest et l'ouest, qui serait compensée par une diminution des autres saisons. Cette perspective ne concerne pas nécessairement les

vallées de Turin, laissées à "l'ombre pluviométrique¹⁷". Dans tous les cas, une accélération des débits sortants en hiver est susceptible d'être observée, causée par une fonte plus rapide de la neige à des températures plus élevées et par une probabilité plus élevée d'avoir des précipitations sous forme liquide plutôt que solide, et une diminution des débits sortants en été (SMS, Région Piémont, 2008).

A cet égard, les valeurs de débit journalier mesurées entre 2003 et 2016 par la station hydrologique de San Martino Chisone, située sur le ruisseau Chisone dans la municipalité de Pinerolo, ont été analysées (figures 11.2 et 11.3). Les données sont mises à disposition par Arpa Piemonte.

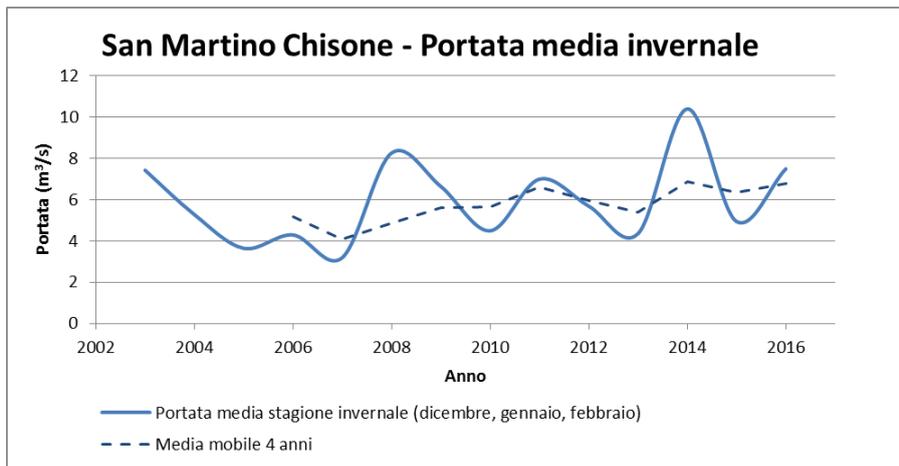


FIGURE 11.2. ÉVOLUTION DU DÉBIT HIVERNAL MOYEN DANS LA STATION DE SAN MARTINO CHISONE ENTRE 2003 ET 2016.

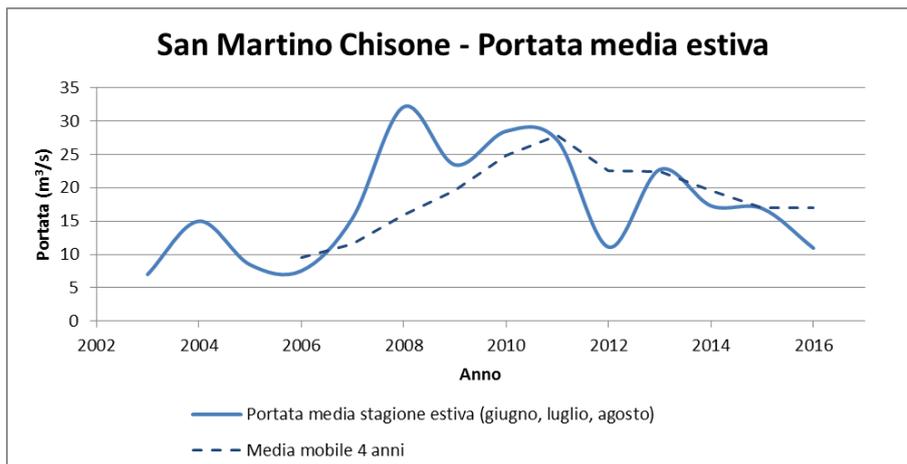


FIGURE 11.3. TENDANCE DU DÉBIT ESTIVAL MOYEN À LA STATION DE SAN MARTINO CHISONE ENTRE 2003 ET 2016.

Comme on peut le voir sur les graphiques ci-dessous, alors que le débit moyen en hiver augmente légèrement, aucune tendance ne peut être défini pour le débit moyen en été. Dans les deux cas, cependant, le faible nombre d'années d'enregistrement et la grande variabilité des valeurs ne permettent pas encore de définir clairement la tendance. Il sera donc essentiel, pour surveiller les effets

¹⁷ Zones à faible pluviométrie due à la conformation orographique. La présence de pentes montagneuses ou d'autres obstacles géographiques opposés aux vents dominants obstruent le passage des systèmes nuageux et les empêchent de se produire.

du changement climatique dans la région, d'analyser périodiquement les données du périmètre pour confirmer ou non les prévisions.

De même, l'augmentation des précipitations intenses, sous l'effet de l'intensification du cycle de l'eau, documenté pour certaines régions européennes au nord des Alpes, n'est pas encore évidente du côté italien de la chaîne de montagnes (SMS, Région Piémont, 2008). Il convient toutefois de garder à l'esprit que la combinaison d'une baisse des précipitations et d'une hausse des températures, en particulier pendant la saison estivale, peut entraîner des conditions de sécheresse plus fréquentes et prolongées. Cette situation peut être aggravée par l'augmentation de la demande en eau dans les zones montagneuses pendant l'été, en raison de l'augmentation probable des flux touristiques pendant la saison chaude et de la grande utilisation de cette ressource pendant l'hiver pour la production de neige artificielle.

11.2.2 INDICATEURS D'IMPACT

Comme nous l'avons vu dans les paragraphes précédents, le changement climatique a un impact sur l'environnement naturel et, par conséquent, sur différents secteurs de l'activité humaine. La biodiversité et la santé des écosystèmes sont menacées, en particulier dans les zones de montagne, qui présentent les équilibres les plus délicats. L'élévation des températures, en particulier, peut entraîner l'élévation de la limite de la forêt et la migration générale des espèces en altitude. Cela met particulièrement en péril les espèces qui occupent les territoires les plus élevés. En raison des sensibilités des différentes espèces, il peut également y avoir des changements majeurs dans la composition et la variété des communautés vivantes, végétales et animales (SMS, Région Piémont, 2008), exacerbés par l'arrivée d'espèces végétales exotiques.

L'agriculture, qui est directement liée aux équilibres des écosystèmes, est l'un des secteurs économiques dont le sort est le plus fortement lié au changement climatique. Ceci est particulièrement pertinent pour le territoire de Pinerolo, où, selon le *Plan Territorial de Coordination Provinciale* de la Province de Turin (2009), il y a un potentiel de développement important lié au secteur viticole, à l'agritourisme et à l'agriculture biologique. Cependant, il est actuellement très difficile de déterminer si le climat futur pourrait représenter un bénéfice global ou un dommage à la production agricole dans les Alpes piémontaises (SMS, Région Piémont, 2008). De nombreux facteurs doivent être pris en compte. L'allongement de la saison de croissance et l'augmentation de la disponibilité du CO₂ pourraient générer une augmentation de la production et il sera possible de cultiver à des altitudes plus basses. Les dommages causés par le gel printanier peuvent diminuer si la période de semis n'est pas modifiée. De plus, la réduction de l'humidité du sol pourrait réduire l'apparition d'attaques par des organismes fongiques. D'autre part, l'arrivée d'espèces phytopathologiques liées à des températures plus élevées et à la rareté de l'eau posera des problèmes critiques et des défis de gestion.

Un autre secteur économique d'importance fondamentale pour le territoire de Pinerolo est le tourisme. Le tourisme, d'été comme d'hiver, est un élément structurel du système socio-économique. Les flux touristiques au printemps et en été sont liés à la jouissance du paysage naturel, grâce à la présence de pistes cyclables et de zones protégées comme le Parc Naturel de Conca Cialancia, le Parc Naturel de la Val Tronca, le Parc Naturel du Monte Tre Denti - Freidour et le Parc Naturel Orsiera-Rocciavère. A cet égard, si la hausse des températures peut allonger la saison touristique estivale et détourner les flux de fréquentation des lieux aux températures plus élevées vers la montagne, la dégradation des écosystèmes, en particulier des forêts, et la perte de biodiversité peuvent avoir une influence négative.

Le tourisme d'hiver, en revanche, est principalement lié aux stations de ski de la région. Suite au développement des infrastructures d'hébergement et des flux générés par les Jeux Olympiques d'hiver 2006, le tourisme hivernal est désormais un élément capable d'apporter une contribution concrète au développement socio-économique local des contreforts des vallées de la Ville Métropolitaine de Turin (Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale, 2009).

Cependant, le manque fréquent et prolongé de neige dans les stations de ski, dû à des chutes de neige plus rares et à la fonte plus rapide du manteau, a mis ce secteur en difficulté (SMS, Région Piémont, 2008). Par exemple, le nombre de jours avec des hauteurs de neige supérieures à 40 cm à la station météorologique du lac de Rochemolles dans la vallée voisine de Susa a diminué de 25 % entre 1961-1989 et 1990-2007 (SMS et Arpa Piemonte, 2008). En outre, la production de neige prévue dépend de facteurs climatiques contraignants : la température et l'humidité déterminent le rendement, tandis que le vent détermine la capacité de transport. Ainsi, plus l'air est humide, plus la température doit être basse pour que les cristaux de neige se forment à partir des fines gouttelettes d'eau. Durant la période 1996-97 à 2007-08, dans la station de ski de Sestriere Principi, entre décembre et mars, une fréquence moyenne de 28% de conditions de neige décentes a été enregistrée, et la fréquence des meilleures conditions est tombée à 15% (SMS et Arpa Piemonte, 2008).

L'altération et la disparition du pergélisol créent également des problèmes de stabilité pour les infrastructures touristiques en haute altitude et rendent les activités alpines dangereuses en raison de chutes de pierres ou d'avalanches potentielles.

Le secteur de l'hydroélectricité peut également être affecté par le changement climatique. Dans la région on compte trois centrales hydroélectriques, situées dans les municipalités de montagne : Inverso Pinasca, Perrero et San Germano Chisone. Les changements dans les régimes d'écoulement sortant des hautes altitudes, principalement en raison de sécheresses estivales plus fréquentes, auront un impact plus important. En général, cette tendance peut être compensée par une plus grande fonte des glaciers pendant les étés chauds, mais seulement à court terme, en raison de la réduction progressive des glaciers eux-mêmes (SMS, Région Piémont, 2008). De plus, il n'y a plus de glaciers dans la région qui sont directement responsables de l'afflux de cours d'eau. Le seul de la région, le glacier Boucher dans la vallée voisine de Susa, est en fait considéré comme "disparu" depuis 1930 (CGI-CNR, 1961)¹⁸.

Le changement climatique a également un impact direct sur la santé humaine, tant en termes de vagues de chaleur possibles et de propagation de nouveaux ravageurs et maladies, qu'en termes de risques naturels qui y sont associés. Les hausses de température représentent un puissant facteur de risque pour la santé, en particulier pour les personnes fragiles, et sont mises en évidence par l'augmentation du nombre de décès dans la population âgée de plus de 65 ans (ARPA, 2017). Le phénomène, cependant, est limité aux zones de plaine du Pinerolo. Toutefois, la propagation de nouvelles maladies et de nouveaux parasites touche également les régions montagneuses. Par exemple, les phlébotomes vecteurs de la leishmaniose du chien, transmissibles aussi à l'homme et endémiques aux régions méditerranéennes, se sont depuis 2003 également propagés dans les vallées alpines (Arpa Piemonte, 2008). L'allongement de la saison de production de pollen aura également une influence sur l'apparition des allergies.

Il n'existe actuellement aucune preuve d'une plus grande fréquence d'inondations ou d'évènement extrêmes par rapport au passé dans la région alpine du Piémont. L'intensité des pics de crue n'est pas toujours directement liée à la quantité de précipitations, puisque d'autres facteurs interviennent également, comme la fonte des neiges et la saturation des sols à l'arrivée des pluies, ce qui rend difficile la prédiction de la tendance de ces phénomènes (SMS, Région Piémont, 2008). Il serait opportun d'étudier plus en profondeur le thème du territoire de Pinerolo, en analysant la récurrence des événements naturels catastrophiques au fil des ans. Les données sur les inondations disponibles jusqu'à présent dans le Système d'information sur les catastrophes hydrogéologiques posent un problème lié à la quantité et à la qualité différentes de l'information dans l'enregistrement des événements au fil du temps. Les archives

¹⁸ CGI-CNR - Comité Glaciologique Italien et Conseil National de la Recherche (1961a) - Registre foncier des Glaciers Italiens, Année Géophysique Internationale 1957-1958. Glaciers du Piémont. Glaciologie Italien, Turin, vol. 2, 324 pp.

complètes du projet AVI indiquent onze documents complets sur le territoire de la municipalité de Pinerolo, dont le plus ancien date de 1629.

Numéro	Date	Environnement physiographique
10500029	/10/2000	Plaine
4500130	//1981	
4500121	18/05/1977	
4500070	03/05/1949	
4500020	21/07/1925	
4500001	24/09/1920	Montagne
4500011	/9/1920	
502198	29/7/1896	Montagne
502178	20/10/1872	Plaine
502144	19/5/1827	Montagne
500073	23/8/1629	Montagne

Tableau 11.2. Inondations identifiées par le projet Avi pour la municipalité de Pinerolo. Source : http://wwwdb.gndci.cnr.it/php2/avi/piene_cum_d.php?comune=Pinerolo&lingua=fr

Numéro du Site	Localité	Date	Fiche S4:
1001191999	Pinerolo – le long du ruisseau Verzate		2000776
1001191001	Pinerolo - le long de la SS n. 23	24/06/1992	6500255
1001191002	San Secondo di Pinerolo - Porte de Pinerolo (entre les deux villages sur la route)	25/04/1995	8500186

Tableau 11.3 : Glissements de terrain étudiés par le projet Avi pour la municipalité de Pinerolo (source : http://wwwdb.gndci.cnr.it/php2/avi/piene_reassunto_d.php?comune=Pinerolo&lingua=en).

11.3 LA PERCEPTION DES IMPACTS

Afin d'obtenir une image plus complète et représentative des impacts du changement climatique dans la zone homogène de Pinerolo, comparée à celle offerte par les quelques études existantes présentées dans le paragraphe précédent, une enquête sur la perception du changement climatique et des actions du gouvernement du territoire préparé à faire face à ses impacts a été menée. En particulier, puisque le WP3 est dédié à l'*Evaluation des défis climatiques pour l'aménagement du territoire*, l'analyse a été adressée aux techniciens et administrateurs des autorités locales de la Ville Métropolitaine de Turin, dont fait partie la zone homogène de Pinerolo.

L'enquête, dans cette première phase, comprenait un questionnaire à réponses fermées adressé aux municipalités de la Ville Métropolitaine de Turin. Les questions ouvertes se limitaient à une discussion approfondie ou à des éclaircissements de la part des répondants. La méthodologie d'analyse prévoit que cette phase soit suivie d'une analyse approfondie par le biais d'entretiens semi-ouverts, dont le contenu serait éclairé et orienté par les résultats de cette première phase.

Le questionnaire est structuré en cinq sections thématiques :

1. Le contexte territorial (Municipalité de travail et taille, rôle joué par le répondant au sein de l'Autorité) ;
2. La perception des impacts du changement climatique ;
3. Pratiques de gouvernance territoriale liées aux changements climatiques ;
4. Formation sur le sujet ;
5. Les obstacles rencontrés dans l'application des mesures d'adaptation au changement climatique.

Le questionnaire a été administré de deux façons :

- sur papier, distribué lors d'événements (séminaire de lancement du projet et rencontre avec les maires de la Zone Homogène de Pinerolo) ;
- en mode numérique, au moyen d'un message électronique contenant les objectifs et les détails du projet et du questionnaire. Le message contenait le fichier questionnaire à imprimer, à remplir et à retransmettre par courriel, ainsi qu'un lien pour remplir le questionnaire directement en ligne (via Google Forms), sans qu'il soit nécessaire de l'imprimer et de le retransmettre.

Avant d'être distribué, le questionnaire a été soumis personnellement à des techniciens municipaux qui s'étaient mis à disposition pour en tester ensemble la clarté et l'efficacité.

La période de distribution et d'administration du questionnaire s'est déroulée entre le 1er décembre 2017 et le 28 février 2018.

Le questionnaire a été envoyé non seulement aux 45 municipalités de la Zone Homogène de Pinerolo mais aussi à l'ensemble des 316 municipalités de la Ville Métropolitaine de Turin. L'objectif était double : d'une part, obtenir un échantillon adéquat par rapport au type d'analyse ; d'autre part, pouvoir comparer les résultats enregistrés sur le territoire de Pinerolo avec ceux de l'ensemble de la ville métropolitaine, ce qui permet d'identifier les particularités du territoire de Pinerolo.

Comme le *livrable 3.1a* se concentre sur l'état de l'art des impacts du changement climatique, la présentation des résultats du questionnaire se limitera ici aux sections 1 (contexte) et 2 (perception) du questionnaire, tandis que les résultats des autres sections sont présentés dans le livrable 3.1b.

11.3.1 LES RÉSULTATS DE L'ENQUÊTE

Au total, 86 questionnaires ont été remplis, dont 27 provenaient de municipalités de la zone homogène de Pinerolo. Quatre municipalités ont répondu anonymement et certaines municipalités ont fourni plus d'un questionnaire, représentant des points de vue différents (ex. du maire et d'un technicien municipal) au sein d'une même municipalité. Le nombre total de municipalités représentées est de 81. La plupart des municipalités ont choisi de remplir le questionnaire en ligne. L'utilisation de Google Forms s'est donc avérée utile à la fois pour les utilisateurs, qui ont apprécié son côté pratique, et pour le groupe de recherche, car l'outil permet de transférer les résultats directement dans un tableau Excel, facilitant ainsi les opérations d'analyse et limitant les marges d'erreur.

Les municipalités de la Zone Homogène de Pinerolo sont représentées à hauteur de 58% ; celles de la Ville Métropolitaine à hauteur de 25%. En ce qui concerne les professions, la majorité des réponses provenaient des techniciens municipaux (86 % des questionnaires remplis).

L'analyse des résultats des questionnaires montre que la région de Pinerolo reflète généralement la perception du changement climatique dans l'échantillon global, à quelques exceptions près. Compte tenu du fait que l'échantillon de questionnaires recueillis sur le territoire de Pinerolo n'est pas numériquement très élevé en termes absolus, les différences constatées entre la perception du changement climatique indiquée par les municipalités de Pinerolo et celle de l'ensemble de l'échantillon doivent être considérées comme indicatives des domaines possibles de connaissances approfondies, mais pas suffisantes en soi pour formuler des hypothèses sur les raisons qui les sous-tendent. Par conséquent, les résultats des questionnaires, présentés dans les pages suivantes, se réfèrent à la zone de Pinerolo, sans comparer les données avec celles recueillies sur l'ensemble de la Ville Métropolitaine de Turin, mais en s'appuyant en même temps sur la représentativité de l'échantillon.

Les communes qui ont répondu au questionnaire sont uniformément réparties (figure 11.4), tant sur le territoire que par bandes altimétriques et types de communes (plaines, collines, montagnes).

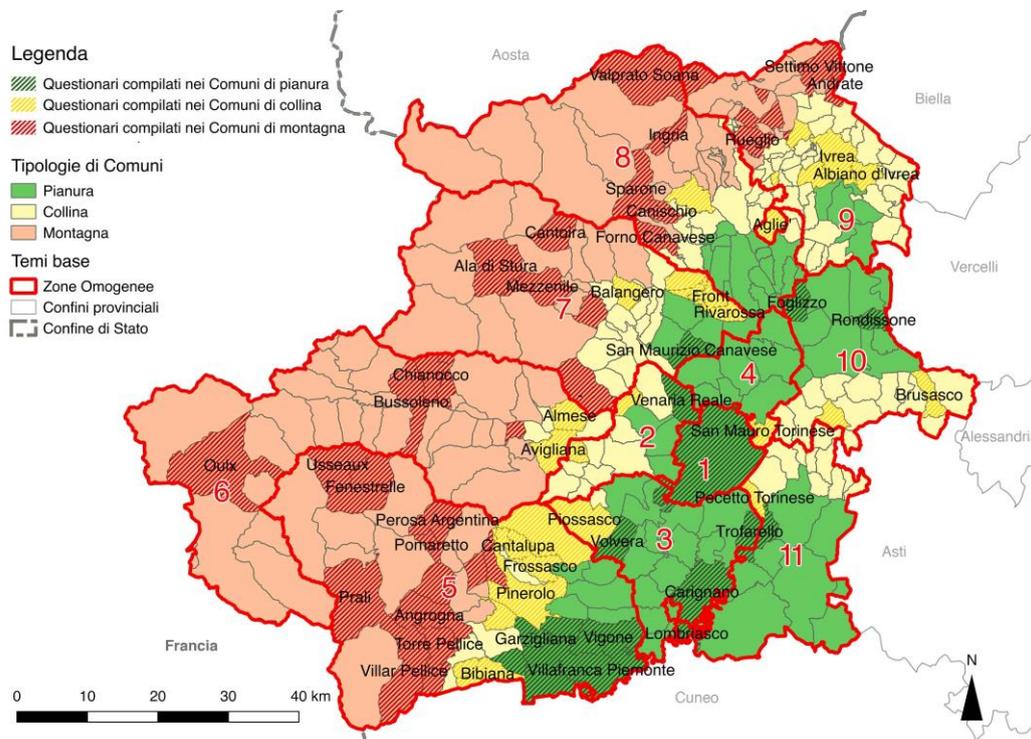


FIGURE 11.4 : CARTE DU TERRITOIRE ANALYSÉ À L'AIDE DE QUESTIONNAIRES

En ce qui concerne le Pinerolo, la majorité des questionnaires remplis proviennent des communes de montagne (44%). Compte tenu de la représentativité de l'échantillon, ce sont les villes de colline qui sont les plus représentées : 7 des 10 villes de colline du Pinerolo ont répondu au questionnaire et une ville (Pinerolo) a donné des réponses de deux points de vue différents (technicien et gestionnaire du secteur de l'urbanisme).

Le taux de réponse au questionnaire (figure 11.5) varie également en fonction de la taille démographique des municipalités, avec des taux plus élevés pour les grandes municipalités et des taux plus faibles pour les municipalités de moins de 5 000 habitants. L'une des raisons de la faible participation des petites municipalités est certainement le manque de ressources humaines au sein des municipalités. Le taux de réponse n'est jamais inférieur à 50 %. La participation du territoire à l'initiative doit donc être considérée comme satisfaisante et représentative dans son ensemble.

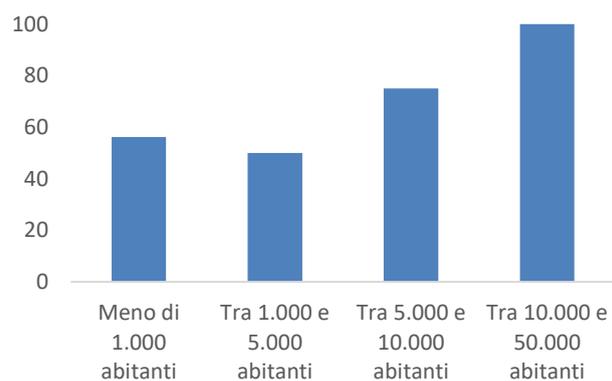


FIGURE 11.5. TAUX DE RÉPONSE : POURCENTAGE DE MUNICIPALITÉS QUI ONT RÉPONDU AU QUESTIONNAIRE SUR LE NOMBRE TOTAL DE MUNICIPALITÉS, SELON LA TAILLE DE LA POPULATION.

Les questions sur la perception du changement climatique étaient liées à la fois au temps présent et au passé et à l'avenir. Les effets du changement climatique sont largement perçus (Figure 11.6) : 85% des répondants déclarent que les effets sont déjà observables, et la majorité d'entre eux déclarent qu'ils sont perçus depuis plus de 5 ans.

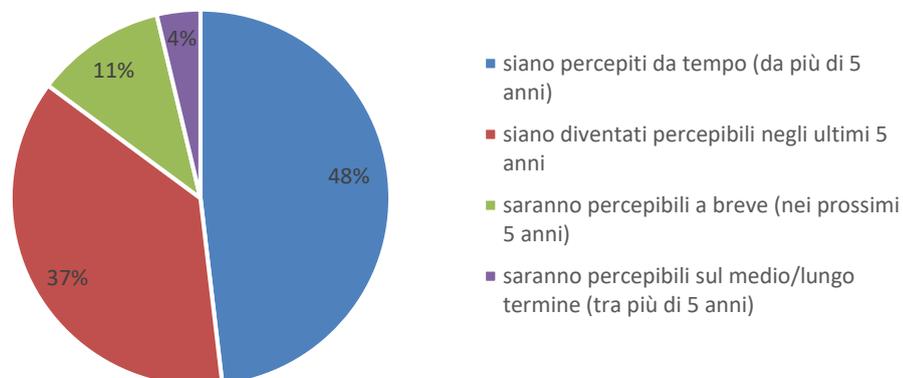


FIGURE 11.6. RÉPONSES À LA QUESTION : « EN TANT QUE TECHNICIEN IMPLIQUÉ-E DANS L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE LOCAL, CROYEZ-VOUS QUE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LE TERRITOIRE DE VOTRE MUNICIPALITÉ... ». POURCENTAGES.

La perception du changement climatique varie également considérablement selon les domaines dans lesquels on pense qu'il a eu un effet (figure 11.7). Deux des questions du questionnaire portaient sur 7 secteurs, en demandant d'indiquer, sur une échelle de -2 à 2 (par ordre d'incidence, de -2 très négatif à +2 très positif), la perception des impacts du changement climatique sur chaque secteur spécifique.

Les 7 secteurs auxquels se réfère le questionnaire sont les secteurs de référence du projet ARTACLIM :

- tourisme ;
- environnement bâti (divisé en bâtiments et approvisionnement en énergie) ;
- agriculture ;
- forêts et bois ;
- dangers naturels
- biodiversité.

Alors que dans certains secteurs, tels que les bâtiments et l'approvisionnement énergétique, les impacts sont considérés comme étant essentiellement neutres ou positifs, dans d'autres, tels que les risques naturels, la biodiversité, l'agriculture et la sylviculture, les impacts négatifs sont clairement prédominants. Dans le cas du tourisme, la perception des impacts est essentiellement neutre : la plupart des répondants ont déclaré que les impacts du changement climatique sur ce secteur ne sont pas perceptibles à ce jour.

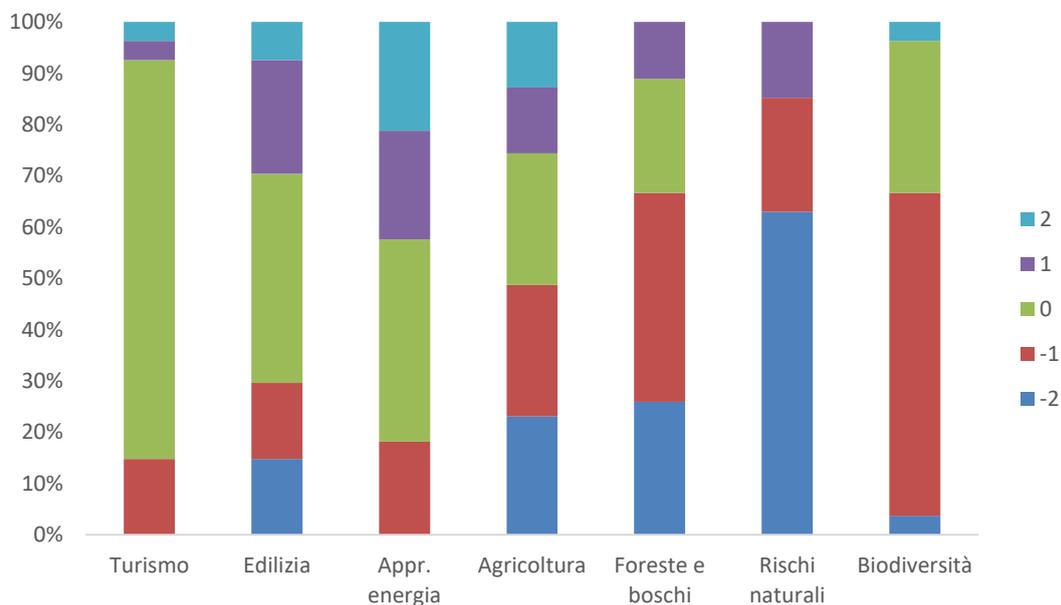


FIGURE 11.7. RÉPONSES À LA QUESTION : « DANS QUELS SECTEURS, PARMIS LES SUIVANTS, CONSIDÉREZ-VOUS QUE LES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SONT DÉJÀ PERCEPTIBLES SUR LE TERRITOIRE DE VOTRE MUNICIPALITÉ ? SONT-ILS POSITIFS OU NÉGATIFS ? INDIQUER LA RÉPONSE SUR UNE ÉCHELLE DE -2 (TRÈS NÉGATIF) À +2 (TRÈS POSITIF), OÙ 0 INDIQUE « NON PERCEPTIBLE ».

Dans l'ensemble, ceux qui croient que les impacts du changement climatique ne sont que positifs ou neutres font partie d'une grande minorité, tandis que 37 % des répondants croient que les impacts du changement climatique ne sont que neutres ou négatifs (figure 11.8).

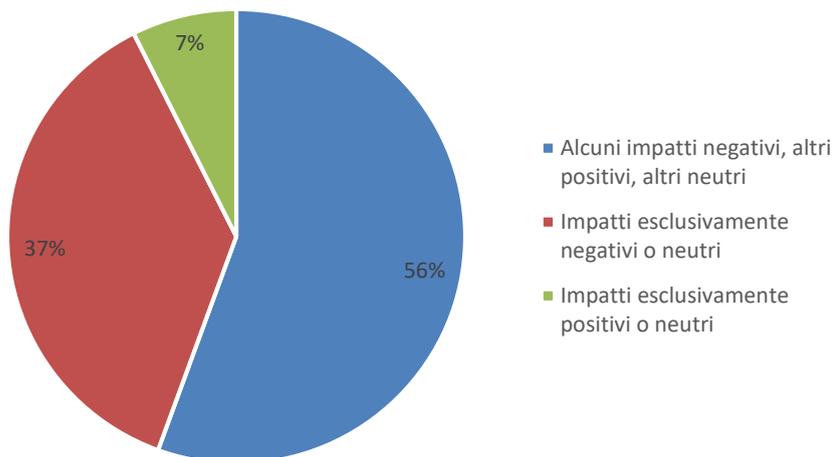


FIGURE 11.8. LA PERCEPTION ACTUELLE DES IMPACTS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

En comparant les réponses en se référant à l'état actuel avec celles se référant au scénario dans 15 ans (figure 11.9), la perception des impacts positifs augmente dans tous les secteurs, et en particulier dans les secteurs de la construction et de l'énergie, dont les impacts perçus étaient déjà globalement positifs dans le scénario actuel. On estime également que les impacts négatifs sont en croissance, bien que les marges de croissance soient plus modérées que les marges positives. Même parmi ceux qui déclarent actuellement que les impacts sont neutres, la perception générale est que d'ici 15 ans, le changement climatique se fera sentir, pour le meilleur ou pour le pire, dans tous les secteurs.

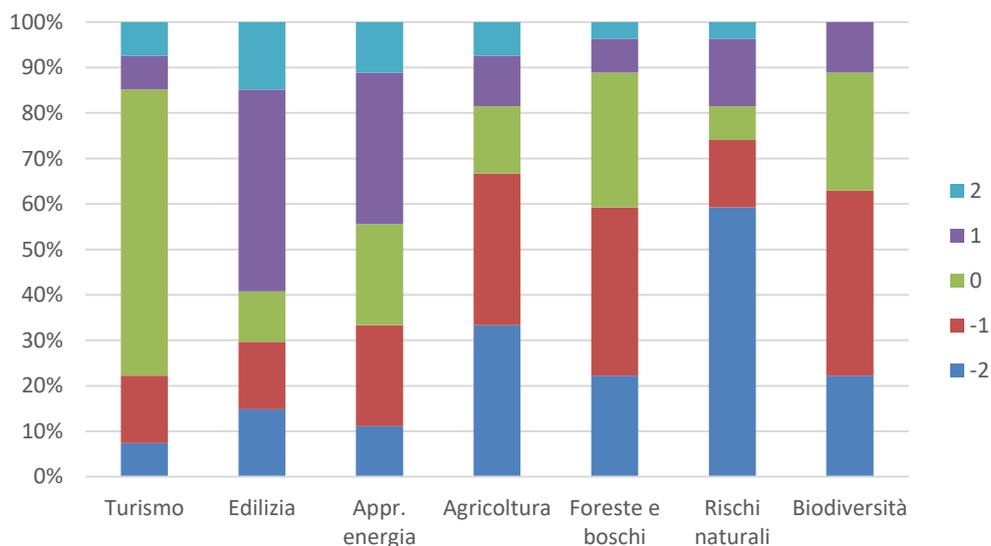


FIGURE 11.9. RÉPONSES À LA QUESTION : « PENSEZ-VOUS QUE CES IMPACTS DANS LES DIFFÉRENTS DOMAINES SECTORIELS SE FERONT SENTIR SUR LE TERRITOIRE DE VOTRE MUNICIPALITÉ DANS 15 ANS ? SI OUI, SERONT-ILS POSITIFS OU NÉGATIFS ? INDIQUER LA RÉPONSE SUR UNE ÉCHELLE DE -2 (TRÈS NÉGATIF) À +2 (TRÈS POSITIF), OÙ 0 INDIQUE « NON PERCEPTIBLE ».

De façon détaillée, par rapport au scénario actuel, dans le scénario futur (dans 15 ans), la perception des impacts du changement climatique est divisée en différents secteurs :

- Tourisme : bien que la part de ceux qui pensent que le changement climatique n'aura pas d'impacts perceptibles reste élevée dans le scénario futur, la part de ceux qui s'attendent à des impacts négatifs augmentera, tout comme la part de ceux qui s'attendent à des impacts positifs, quoique dans une moindre mesure ;
- Construction : la proportion de ceux qui croient que les impacts sont positifs a augmenté de façon significative, tandis que la proportion de ceux qui croient que les impacts sont négatifs est demeurée stable ;
- Approvisionnement énergétique : la part de ceux qui prévoient des impacts positifs et négatifs augmente, et par conséquent la part de ceux qui prévoient des impacts neutres diminue ;
- Agriculture : plus de gens croient que le changement climatique aura des impacts négatifs, alors que la part des impacts positifs est réduite ;
- Forêts et bois : la perception actuelle est sensiblement la même que la perception future ;
- Risques naturels : la proportion de ceux qui s'attendent à des impacts négatifs est réduite et la proportion de ceux qui s'attendent à des impacts positifs augmente légèrement ;
- Biodiversité : ceux qui s'attendent à des impacts négatifs et ceux qui s'attendent à des impacts positifs augmentent légèrement.

Au-delà de la valeur positive ou négative associée au changement climatique, l'importance qui lui est attribuée est élevée (Figure 11.10) : sur une échelle de 1 à 5, 59% des répondants considèrent le changement climatique comme très important (valeurs 4 ou 5), alors que seulement 22% le considèrent comme insignifiant (valeurs 1 ou 2).

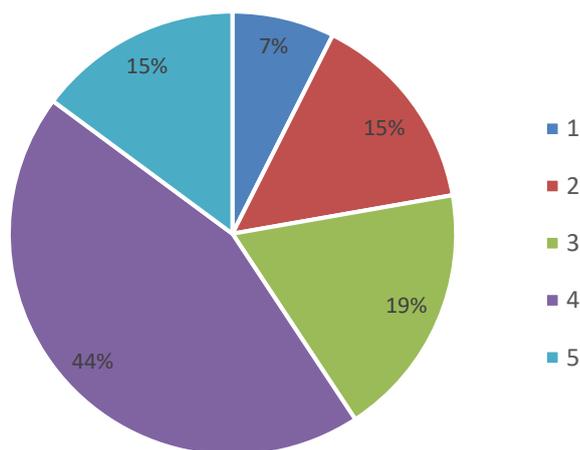


FIGURE 11.10. RÉPONSES À LA QUESTION : « EN TANT QUE TECHNICIEN LOCAL DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE, DANS QUELLE MESURE CONSIDÉREZ-VOUS LE CHANGEMENT CLIMATIQUE COMME UN PHÉNOMÈNE IMPORTANT SUR VOTRE TERRITOIRE ? INDIQUER LA RÉPONSE SUR UNE ÉCHELLE ALLANT DE 0 (PAS DU TOUT IMPORTANT) À 5 (EXTRÊMEMENT IMPORTANT) ».

La perception du changement climatique s'est accrue ces dernières années et ceci est le résultat d'événements naturels qui ont rendu évidents les processus de changement qui ont lieu depuis un certain temps et qui sont au centre du débat. Le questionnaire demandait explicitement d'indiquer si la perception du changement climatique avait augmenté au cours des deux ou trois dernières années à la suite d'événements naturels (tels que les inondations, les sécheresses et les incendies) et de préciser la

nature de ces événements. Sur les 27 questionnaires remplis sur le territoire de Pinerolo, la perception n'est restée la même dans un seul cas, tandis que dans tous les autres cas, la perception a augmenté à la suite d'événements naturels. Les principaux événements qui ont contribué à accroître la perception du changement climatique sur le territoire de Pinerolo sont doubles :

- des précipitations très intenses et des inondations, comme l'indiquent 78 % des répondants ; les perturbations hydrogéologiques et les tempêtes particulièrement intenses sont aussi directement liées aux précipitations ;
- La sécheresse, indiquée par 33 % des répondants, qui est associée aux incendies et à la rareté de l'eau.

En plus des événements liés à l'eau - trop ou trop peu – ont été signalés l'augmentation des températures, tant en hiver qu'en été, et les phénomènes météorologiques inhabituels pour leurs saisons respectives (par exemple, chutes de neige au printemps, grêle et tempêtes en hiver).

12 CONCLUSIONS

L'analyse de la littérature scientifique et des projets de recherche sur les impacts du changement climatique dans le contexte alpin a montré à quel point le niveau d'incertitude sur le sujet est élevé. Cette incertitude est déterminée par de nombreux facteurs, dont le type de scénario retenu comme cadre de l'évolution future, l'hétérogénéité de l'espace alpin (qui comprend des territoires très différents selon l'altitude, le degré d'urbanisation, le niveau d'accessibilité et d'utilisation, etc.), la sensibilité différente des secteurs et des zones considérées, etc.

Plus l'on descend d'échelle, de la grande région alpine aux trois zones choisies comme études de cas du projet Artaclim, plus cette incertitude, qui s'exprime de plusieurs points de vue, augmente. Tout d'abord, il s'agit de l'ampleur des impacts, c'est-à-dire la mesure dans laquelle un certain phénomène naturel ou anthropique est lié au changement climatique ou à d'autres dynamiques. Deuxièmement, en ce qui concerne la direction de l'impact, qu'il soit positif ou négatif : dans le cas des consommations énergétiques, par exemple, il est apparu que les hausses de température entraînent une réduction de la consommation d'énergie hivernale pour le chauffage des bâtiments, mais en même temps une augmentation en été par rapport à l'utilisation des climatiseurs.

Malgré ces incertitudes, les preuves du changement climatique ressortent clairement à la fois de l'analyse de la littérature et des entretiens et enquêtes menés dans les trois études de cas, qui montrent une perception claire par les acteurs locaux du changement actuel. Ce document résume les principaux impacts que le changement climatique - avec toutes les marges d'incertitude mentionnées ci-dessus - génère dans les territoires alpins et constitue donc un outil utile pour répondre à la question principale de la Communauté de Communes du Haut Chablais, du Parc Naturel Régional du Massif des Bauges et de la Zone Homogène de Pinerolo : plus d'informations sur le changement climatique, pour agir avec plus de conscience, en commençant par la préparation et la co-construction de stratégies de réponse et d'outils d'aménagement du territoire pour y répondre.

Le *rapport 3.1b* du projet ARTACLIM est en lien avec ce document : il passe en revue les bonnes pratiques qui peuvent être mises en pratique au niveau local en réponse aux impacts du changement climatique.

13 BIBLIOGRAPHIE

Chapitre 1

- AlpMedia. (2002). Le changement climatique et les Alpes. Un rapport de synthèse. Mars 2002, http://www.cipra.org/fr/dossiers/1/24_fr/inline-download
- Beniston, M. (2005). Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8-9), 1587-1606.
- Beniston, M., Stoffel, M., & Hill, M. (2011). Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: can current water governance cope with future challenges? Examples from the European “ACQWA” project. *Environmental science & policy*, 14(7), 734-743.
- Bernard, L. (2017). *Mécanismes fonctionnels de résilience des prairies subalpines au changement global* (Doctoral dissertation, Grenoble Alpes).
- Convenzione delle Alpi. (2013). *Orientations en matière d'adaptation locale au changement climatiques dans les Alpes*.
- Durand, Y., Laternser, M., Giraud, G., Etchevers, P., Lesaffre, B., & Mérindol, L. (2009a). Reanalysis of 44 yr of climate in the French Alps (1958–2002): methodology, model validation, climatology, and trends for air temperature and precipitation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(3), 429-449.
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Mérindol, L., & Lesaffre, B. (2009b). Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958–2005): climatology and trends for snow cover. *Journal of applied meteorology and climatology*, 48(12), 2487-2512.
- EEA. (2009a). Regional Climate Change and Adaptation: The Alps Facing the Challenge of Changing Water Resources.
- EEA. (2009b). *Signaux de l'AEE 2009, Thèmes Environnementaux Clés Pour l'Europe*. In: European Environment Agency, *Regional climate change and adaptation, The Alps facing the challenge of changing water resources*. Copenhagen, Denmark.
- Gardent, M., Rabatel, A., Dedieu, J. P., & Deline, P. (2014). Multitemporal glacier inventory of the French Alps from the late 1960s to the late 2000s. *Global and Planetary Change*, 120, 24-37.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138-1151.
- Hewitt, C.D. (2005). *The ENSEMBLES Project: Providing ensemble-based predictions of climate changes and their impacts*. Published article appears in the EGG5 newsletter, 13, 22-25. <http://www.the-eggs.org/?issueSel=24>
- Huss, M. (2012). Extrapolating glacier mass balance to the mountain range scale: the European Alps 1900–2100. *The Cryosphere Discuss.*, 6, 1117-1156. doi:10.5194/tc-6-713-2012, 2012.
- IPCC. (2013) [Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G. K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., ... & Midgley, P. M.]. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1535 pp. doi:10.1017/CBO9781107415324.
- Jacob, D.; Göttel, H.; Kotlarski, S. & Lorenz, P. (2007). *Mögliche Klimaänderungen im Alpenraum'*. In: Bundesumweltministerium (Ed.): *Klimawandel in den Alpen: Fakten — Folgen — Anpassung*, pp. 22–27.
- Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., ... & Boehm, U. (2008). Climate simulation with CLM, Climate of the 20th century, Data Stream 3: European region MPI-M/MaD. *World Data Center for Climate*.
- Météo-France. (2012). *Climat de la région Rhône-Alpes*. Document réalisé par Météo-France pour la DREAL Rhône-Alpes. http://www.auvergne-rhone-alpes.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/Climat_actuel_en_Rhone-Alpes_septembre_2010_cle0b2cd1.pdf
- Moisselin, J. M. (2002). Les précipitations en France au XXème siècle. *Fr. Chang. Glob*, 13, 57-62.
- Morin, S., Lejeune, Y., Lesaffre, B., Panel, J. M., Poncet, D., David, P., & Sudul, M. (2012). An 18-yr long (1993-2011) snow and meteorological dataset from a mid-altitude mountain site (Col de Porte, France, 1325 m alt.) for driving and evaluating snowpack models. *Earth System Science Data*, 4(1), 13.
- Moss, R., Babiker, W., Brinkman, S., Calvo, E., Carter, T., Edmonds, J., ... & Jones, R. N. (2008). *Towards New Scenarios for the Analysis of Emissions: Climate Change, Impacts and Response Strategies*. Geneva, Intergovernmental Panel on Climate Change, 132 p.

- Philipona, R. (2013). Greenhouse warming and solar brightening in and around the Alps. *International Journal of Climatology*, 33(6), 1530-1537.
- Prudent-Richard, G., Gillet, M., Vengeon, J.M., Descotes-Genon, S., Einhorn, B., Bourjot, L., ... & Marcelpoil, E. (2008), *Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels*. Rapport Technique N°1, ONERC (Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique), Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PGRN), Région Rhône-Alpes, 100 pp.
- Rabatel, A. (2015). *Apports d'une approche combinant mesures in situ et télédétection optique pour le suivi des glaciers de montagne: cas des Andes tropicales et des Alpes occidentales* (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- Schär, C., & Jendritzky, G. (2004). Climate change: hot news from summer 2003. *Nature*, 432(7017), 559.
- Scherrer, S. C., Appenzeller, C., Liniger, M. A., & Schär, C. (2005). European temperature distribution changes in observations and climate change scenarios. *Geophysical Research Letters*, 32(19).
- Schmidli, J., & Frei, C. (2005). Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *International Journal of Climatology*, 25(6), 753-771.
- Schöner, W., Auer, I., & Böhm, R. (2009). Long term trend of snow depth at Sonnblick (Austrian Alps) and its relation to climate change. *Hydrological Processes*, 23(7), 1052-1063.
- Sérès, C. (2010). Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne: premiers éléments de réflexion. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 58(58), 21-36.
- Verfaillie, D., Déqué, M., Morin, S., & Lafaysse, M. (2017). The method ADAMONT v1. 0 for statistical adjustment of climate projections applicable to energy balance land surface models. *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4257-4283.

Chapitre 2

- ADAMONT – Impacts du changement climatique et adaptation des territoires de montagne. (2018a). *Changement climatique et risques naturels*, fiche thématique.
- ADAMONT – Impacts du changement climatique et adaptation des territoires de montagne. (2018b). *Changement climatique et forêts de montagne*, fiche thématique.
- Association Nationale pour l'Étude de la Neige et des Avalanches – ANENA. (2015). Dossier: Le changement climatique: impacts sur le climat, l'activité avalancheuse et l'activité des stations de skis. *Neige et Avalanches*, 151, octobre 2015, 10p.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., ... & Jones, P. (2007). HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International journal of climatology*, 27(1), 17-46.
- Beniston, M. (2005). Mountain climates and climatic change: an overview of processes focusing on the European Alps. *Pure and Applied Geophysics*, 162(8-9), 1587-1606.
- Beniston, M., Fox, D.G., Adhikary, S., Andressen, R., Guisan A., Holten, J., ... & Tessier, L. (1996). The Impacts of Climate Change on Mountain Regions. In: *Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC), Chapter 5, Cambridge University Press, pp. 191-213.
- Blanchet, J., Molinié, G., & Touati, J. (2016). Spatial analysis of trend in extreme daily rainfall in southern France. *Climate Dynamics*, 1-14.
- Bodin, X., Schoeneich, P., Deline, P., Ravanel, L., Magnin, F., Krysiecki, J. M., & Echelard, T. (2015). Le permafrost de montagne et les processus géomorphologiques associés: évolutions récentes dans les Alpes françaises. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (103-2).

- Boudières, V., Delannoy, J.J., Einhorn, B., George-Marcelpoil, E., Peisser, C., & Piazza-Morel, D. (2013). Synthèse du Workshop «Changement global et risques naturels», PARN et Labex ITEM, 21-22 mars 2013, 30 pp.
- Carlson, B. Z., Georges, D., Rabatel, A., Randin, C. F., Renaud, J., Delestrade, A., ... & Thuiller, W. (2014). Accounting for tree line shift, glacier retreat and primary succession in mountain plant distribution models. *Diversity and Distributions*, 20(12), 1379-1391.
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, G., Durand, Y., & Morin, S. (2014). Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020-2050 and 2070-2100 periods. *The Cryosphere*, 8(5), 1673-1697.
- Convenzione delle Alpi. (2014). Orientations en matière d'adaptation locale au changement climatique dans les Alpes. Signaux alpins – 7, 45 pp.
- Convention Interrégionale du Massif des Alpes (CIMA) 2015-2020. (2015). Etat, Conseil régional Rhône-Alpes et Conseil régional Provence-Alpes-Côte d'Azur, 22pp.
- D'Amato, J., Hantz, D., Guerin, A., Jaboyedoff, M., Baillet, L., & Mariscal, A. (2016). Influence of meteorological factors on rockfall occurrence in a middle mountain limestone cliff. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(3), 719-735.
- Dupire, S., Curt, T., & Bigot, S. (2017). Spatio-temporal trends in fire weather in the French Alps. *Science of the Total Environment*, 595, 801-817.
- Durand, Y., Giraud, G., Laternser, M., Etchevers, P., Mérindol, L., & Lesaffre, B. (2009). Reanalysis of 47 years of climate in the French Alps (1958–2005): climatology and trends for snow cover. *Journal of applied meteorology and climatology*, 48(12), 2487-2512.
- Einhorn, B. (2015). Les risques naturels en montagne en 2015: un avant-goût des impacts du changement climatique? *Nature et Patrimoine en Pays de Savoie*, 47, pp. 26-31.
- Einhorn, B., & Gérard, S. (2017). Changement climatique et risques naturels dans les Alpes. Événements remarquables 2015. Rapport technique PARN, 23pp.
- Einhorn, B., Eckert, N., Chaix, C., Ravanel, L., Deline, P., Gardent, M., ... & Schoeneich, P. (2015). Changements climatiques et risques naturels dans les Alpes. Impacts observés et potentiels sur les systèmes physiques et socio-économiques. *Journal of Alpine Research | Revue de géographie alpine*, (103-2).
- European Environment Agency – EEA. (2017a). Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016, an indicator-based report. No 1/2017.
- European Environment Agency – EEA. (2017b). Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe, Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices. No 15/2017.
- Garitte, G., Lahousse, P., Thénard, L., & Salvador, P. G. (2007). Évolution contemporaine de l'activité torrentielle sur les cônes de déjection de la basse vallée de la Clarée (Briançonnais, Alpes françaises du Sud). *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 13(4), 293-308.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138-1151.
- Jomelli, V., Brunstein, D., Déqué, M., Vrac, M., & Grancher, D. (2009). Impacts of future climatic change (2070–2099) on the potential occurrence of debris flows: a case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, 97(1-2), 171-191.
- Jomelli, V., Pavlova, I., Eckert, N., Grancher, D., & Brunstein, D. (2015). A new hierarchical Bayesian approach to analyse environmental and climatic influences on debris flow occurrence. *Geomorphology*, 250, 407-421.

- Jouzel, J., Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., & Vautard, R. (2014). Le climat de la France au XXI^e siècle. Volume 4. Scénarios régionalisés: édition 2014 pour la métropole et les régions d'outre-mer. *Rapports de la Direction générale de l'Énergie et du Climat*.
- Le Bidan, V. (2011). Adaptation de la gestion des risques naturels en Isère. Actes du séminaire international d'experts «Adaptation de la gestion des risques naturels face au changement climatique» 26 janvier 2011, Domancy (Haute-Savoie).
- Lescurier, A. (2011). Adaptation de la gestion des risques naturels en Savoie. Actes du séminaire international d'experts «Adaptation de la gestion des risques naturels face au changement climatique», 26 janvier 2011, Domancy (Haute-Savoie).
- Naaïm, M., Eckert, N., Giraud, G., Faug, T., Chambon, G., Naaïm-Bouvet, F., & Richard, D. (2016). Impact du réchauffement climatique sur l'activité avalanchreuse et multiplication des avalanches humides dans les Alpes françaises. *La Houille Blanche*, (6), 12-20.
- Observatoire régional des effets du changement climatique – ORECC. (2016). Profil Climat Territorial Montagne – Alpes du Nord, 26pp.
- Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE). (2007). Changements climatiques dans les Alpes européennes: Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. Rapport, 140 pp.
- Ouzeau, G., Déqué, M., Jouini, M., Planton, S., Vautard, R., & Jouzel, J. (2014). Le climat de la France au XXI^e siècle. *Rapport de la Direction générale de l'énergie et du climat*, www.developpement-durable.gouv.fr.
- Ouzeau, G., Soubeyroux, J. M., Schneider, M., Vautard, R., & Planton, S. (2016). Heat waves analysis over France in present and future climate: application of a new method on the EURO-CORDEX ensemble. *Climate Services*, 4, 1-12.
- Parc Naturel Régional (PNR) du massif des Bauges. (2014). *Plan Climat Energie Territoire. Livre blanc*. Rapport, 99 p.
- PARN. (2017). Lettre d'information «Alpes-Climat-Risques», 6, Juillet 2017, 26 pp.
- PARN. (2018). Actes du séminaire transversal Science-Décision-Action: «L'enclavement des vallées alpines par les risques naturels», <http://risknat.org/seminaire-enclavement-des-vallées-alpines-par-les-risques-naturels/>
- Permanent Secretariat of the Alpine Convention. (ed.) (2011). Sustainable rural development and innovation, Report on the state of the Alps. Alpine Signals, Special edition 3, Permanent Secretariat of the Alpine Convention. Innsbruck, Bolzano,
- Philippe, F., Forestier, E., Piazza-Morel, D., & Arlot, M.P. (2017). *Atelier Risques naturels et accessibilité du 24 mars 2017, Compte rendu des échanges*. Projet ADAMONT, 14pp.
- PLANALP. (2012). Alpine strategy for adaptation to climate change in the field of natural hazards. Plateforme Risques naturels de la Convention Alpine, Berne.
- Programme Opérationnel Interrégional FEDER du Massif des Alpes (POIA) - Période 2014-2020. (2014). Version finale au 28/05 /2014, 108pp.
- Ravanel, L., Magnin, F., & Deline, P. (2017). Impacts of the 2003 and 2015 summer heatwaves on permafrost-affected rock-walls in the Mont Blanc massif. *Science of The Total Environment*, 609, 132-143.
- Rousselot, M., Durand, Y., Giraud, G., Méréndol, L., Dombrowski-Etchevers, I., Déqué, M., & Castebrunet, H. (2012). Statistical adaptation of ALADIN RCM outputs over the French Alps-application to future climate and snow cover. *The Cryosphere*, 6, 785-805.
- Saez, J. L., Corona, C., Stoffel, M., & Berger, F. (2013). Climate change increases frequency of shallow spring landslides in the French Alps. *Geology*, 41(5), 619-622.

Vengeon, J.M. (2006). *Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space* [ClimChAlp WP5 Knowledge base presentation]. Presentation at the Wengen Workshop 2006: "Adaptation to the Impacts of Climate Change in the European Alps", Wengen, October 4-6, 2006.

Chapitre 3

Bosello, F., Marazzi, L., & Nunes, P. A. L. D. (2007, July). Le Alpi italiane e il cambiamento climatico: elementi di vulnerabilità ambientale ed economica, e possibili strategie di adattamento. In *Report prepared for the APAT Workshop on "Cambiamenti climatici e ambienti nivo-glaciali: scenari e prospettive di adattamento"*, Saint-Vincent (pp. 2-3).

Bregaglio, S., Donatelli, M., & Confalonieri, R. (2013). Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030–2050. *Agronomy for sustainable development*, 33(4), 767-776.

Chaix, C., Dodier, H. & Nettier, B. (2017). *Comprendre le changement climatique en alpage*. Une production du réseau Alpages Sentinelles, 24 pp.

CLIMAGRI - Cambiamenti Climatici e Agricoltura. (2003). *Agricoltura italiana e cambiamenti climatici* - Atti del Workshop. Zinoni, F. & Duce, P., Cagliari, 22 pp.

Davidson, E. A., & Janssens, I. A. (2006). Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 440(7081), 165.

Envirochange. L'impatto del cambiamento climatico sulle malattie delle piante. <http://www.ambienteterritorio.coldiretti.it/tematiche/Ogm/Documents/clima%20e%20fitosanitari.pdf>

Flury, C., Huber, R., & Tasser, E. (2013). Future of mountain agriculture in the Alps. In *The Future of Mountain Agriculture* (pp. 105-126). Springer, Berlin, Heidelberg.

Fuhrer, J., & Jasper, K. (2012). Demand and supply of water for agriculture: influence of topography and climate in pre-alpine, mesoscale catchments. *Natural Resources*, 3(03), 145.

Fuhrer, J., Smith, P., & Gobiet, A. (2014). Implications of climate change scenarios for agriculture in alpine regions—A case study in the Swiss Rhone catchment. *Science of the Total Environment*, 493, 1232-1241.

Iglesias, A., Quiroga, S., Moneo, M., & Garrote, L. (2012). From climate change impacts to the development of adaptation strategies: challenges for agriculture in Europe. *Climatic Change*, 112(1), 143-168.

Lavalle, C., Micale, F., Houston, T. D., Camia, A., Hiederer, R., Lazar, C., ... & Genovese, G. (2009). Climate change in Europe. 3. Impact on agriculture and forestry. A review. *Agronomy for sustainable Development*, 29(3), 433-446.

Mann, S. (Ed.). (2013). *The future of mountain agriculture*. Springer Science & Business Media.

McDonald, P., Edwards, R. A., Greenhalgh, J. F. D., Morgan, C. A., & Sinclair, L. A. (2002). *Animal Nutrition*, Prentice Hall.

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. (2014). *Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia*. Roma, 878 pp.

Mitchell, C. E., Reich, P. B., Tilman, D., & Groth, J. V. (2003). Effects of elevated CO₂, nitrogen deposition, and decreased species diversity on foliar fungal plant disease. *Global Change Biology*, 9(3), 438-451.

Petzoldt, C. & Seaman, A., 2010. Climate Change Effects on Insects and Pathogens. pp. 6- 16. Petzoldt, C., & Seaman, A. (2010). *Climate Change Effects on Insects and Pathogens. Climate Change and Agriculture: Promoting Practical and Profitable Responses*. New York State Agricultural Extension Station, Geneva, NY 14456.

Reddy, P. P. (2013). Impact of climate change on insect pests, pathogens and nematodes. *Pest Management In Horticultural Ecosystems*, 19(2), 225-233.

- Rossi, C.A.S. & Compiani R. (2017). Stress da caldo, compromesso il benessere dei bovini. *Informatore Zootecnico*, <https://informatorezootecnico.edagricole.it/>
- Rounsevell, M.D.A. (1999). Spatial modelling at the regional scale of the response and adaptation of soils and land use systems to climate change: the IMPEL project. Research report to the Commission of the European Communities, Environment and Climate Programme, Framework IV 1999.
- Sérès, C. (2010). Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne: premiers éléments de réflexion. *Le Courrier de l'environnement de l'INRA*, 58(58), 21-36.
- Vanham, D. (2012). The Alps under climate change: implications for water management in Europe. *Journal of Water and Climate Change*, 3(3), 197-206.
- West, J. W. (2003). Effects of heat-stress on production in dairy cattle. *Journal of dairy science*, 86(6), 2131-2144.
- Williams, W. D. (2001). Anthropogenic salinisation of inland waters. In *Saline Lakes* (pp. 329-337). Springer, Dordrecht.

Chapitre 4

- Ambrosetti, W., & Barbanti, L. (2002). Physical limnology of Italian lakes. 1. Relationship between morphometry and heat content. *Journal of Limnology*, 61(2), 147-157.
- Angelini, P., & Weldeyesus E. (2017). Normativa e politiche della Convenzione delle Alpi in materia di aree protette. In AA.VV. *Sviluppare il potenziale delle aree protette alpine. 1° Report della rete SAPA – Sistema delle aree protette alpine italiane*. Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare
- Aublet, J. F., Festa-Bianchet, M., Bergero, D., & Bassano, B. (2009). Temperature constraints on foraging behaviour of male Alpine ibex (*Capra ibex*) in summer. *Oecologia*, 159(1), 237-247.
- Barnett, T. P., Adam, J. C., & Lettenmaier, D. P. (2005). Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature*, 438(7066), 303.
- Bates, B. C., Kundzewicz, Z. W., Wu, S., & Palutikof, J. P. (2008). Climate Change and Water: Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change [7.11 MB]. *IPCC Secretariat: Geneva*.
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E., & Larsson, S. (2006). A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12(4), 662-671.
- Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005). Expansion of geographic range in the pine processionary moth caused by increased winter temperatures. *Ecological applications*, 15(6), 2084-2096.
- Bickford, D., Howard, S. D., Ng, D. J., & Sheridan, J. A. (2010). Impacts of climate change on the amphibians and reptiles of Southeast Asia. *Biodiversity and conservation*, 19(4), 1043-1062.
- Bisi, F., Wauters, L. A., Preatoni, D. G., & Martinoli, A. (2015). Interspecific competition mediated by climate change: which interaction between brown and mountain hare in the Alps?. *Mammalian Biology-Zeitschrift für Säugetierkunde*, 80(5), 424-430.
- Brambilla, M., Bergero, V., Bassi, E., & Falco, R. (2015). Current and future effectiveness of Natura 2000 network in the central Alps for the conservation of mountain forest owl species in a warming climate. *European journal of wildlife research*, 61(1), 35-44.
- Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., & Larsson, S. (2007). Temperature as a predictor of survival of the pine processionary moth in the Italian Alps. *Agricultural and Forest Entomology*, 9(1), 65-72.

- Cantonati, M., & Lazzara, M. (Eds.). (2006). *I laghi di alta montagna del bacino del fiume Avisio (Trentino Orientale)* (Vol. 3). MUSE-Museo delle Scienze.
- Carlson, B. Z., Georges, D., Rabatel, A., Randin, C. F., Renaud, J., Delestrade, A., ... & Thuiller, W. (2014). Accounting for tree line shift, glacier retreat and primary succession in mountain plant distribution models. *Diversity and Distributions*, *20*(12), 1379-1391.
- Castellari, S., Venturini, S., Ballarin Denti, A., Bigano, A., Bindi, M., Bosello, F., ... & Filpa, A. (2014). Rapporto sullo stato delle conoscenze scientifiche su impatti, vulnerabilità ed adattamento ai cambiamenti climatici in Italia. *MATTM-Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, Roma*.
- D'Amen, M., & Bombi, P. (2009). Global warming and biodiversity: Evidence of climate-linked amphibian declines in Italy. *Biological Conservation*, *142*(12), 3060-3067.
- D'Amen, M., Bombi, P., Pearman, P. B., Schmatz, D. R., Zimmermann, N. E., & Bologna, M. A. (2011). Will climate change reduce the efficacy of protected areas for amphibian conservation in Italy?. *Biological Conservation*, *144*(3), 989-997.
- Domisch, S., Araújo, M. B., Bonada, N., Pauls, S. U., Jähnig, S. C., & Haase, P. (2013). Modelling distribution in European stream macroinvertebrates under future climates. *Global Change Biology*, *19*(3), 752-762.
- Dorts, J., Grenouillet, G., Douxfils, J., Mandiki, S. N., Milla, S., Silvestre, F., & Kestemont, P. (2012). Evidence that elevated water temperature affects the reproductive physiology of the European bullhead *Cottus gobio*. *Fish physiology and biochemistry*, *38*(2), 389-399.
- Eckhardt, K., & Ulbrich, U. (2003). Potential impacts of climate change on groundwater recharge and streamflow in a central European low mountain range. *Journal of Hydrology*, *284*(1-4), 244-252.
- Erschbamer, B., Unterluggauer, P., Winkler, E., & Mallaun, M. (2011). Changes in plant species diversity revealed by long-term monitoring on mountain summits in the Dolomites (northern Italy). *Preslia*, *83*(3), 387.
- Ferrarini, A., Alatalo, J. M., & Gustin, M. (2017). Climate change will seriously impact bird species dwelling above the treeline: A prospective study for the Italian Alps. *Science of the Total Environment*, *590*, 686-694.
- Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., & Zimmermann, N. E. (2007). Tree line shifts in the Swiss Alps: climate change or land abandonment?. *Journal of vegetation science*, *18*(4), 571-582.
- Grignolio, S., Rossi, I., Bassano, B., Parrini, F., & Apollonio, M. (2004). Seasonal variations of spatial behaviour in female Alpine ibex (*Capra ibex ibex*) in relation to climatic conditions and age. *Ethology Ecology & Evolution*, *16*(3), 255-264.
- Hari, R. E., Livingstone, D. M., Siber, R., Burkhardt-Holm, P., & Guettinger, H. (2006). Consequences of climatic change for water temperature and brown trout populations in Alpine rivers and streams. *Global Change Biology*, *12*(1), 10-26.
- Henle, K., Dick, D., Harpke, A., Kühn, I., Schweiger, O., & Settele, J. (2008, November). Climate change impacts on European amphibians and reptiles. In *Biodiversity and climate change: Reports and guidance developed under the Bern Convention Council of Europe Publishing, Strasbourg, France* (pp. 225-305).
- Imperio, S., Bionda, R., Viterbi, R., & Provenzale, A. (2013). Climate change and human disturbance can lead to local extinction of Alpine rock ptarmigan: New insight from the Western Italian Alps. *PloS one*, *8*(11), e81598.
- Jasper, K., Calanca, P., Gyalistras, D., & Fuhrer, J. (2004). Differential impacts of climate change on the hydrology of two alpine river basins. *Climate Research*, *26*(2), 113-129.

- Kernan, M., Battarbee, R. W., & Moss, B. R. (Eds.). (2011). *Climate change impacts on freshwater ecosystems*. John Wiley & Sons.
- Lappalainen, J., & Tarkan, A. S. (2007). Latitudinal gradients in onset date, onset temperature and duration of spawning of roach. *Journal of Fish Biology*, *70*(2), 441-450.
- Ludovisi, A., Gaino, E., Bellezza, M., & Casadei, S. (2013). Impact of climate change on the hydrology of shallow Lake Trasimeno (Umbria, Italy): History, forecasting and management. *Aquatic ecosystem health & management*, *16*(2), 190-197.
- Luoto, T. P., & Nevalainen, L. (2012). Ecological responses of aquatic invertebrates to climate change over the past ~ 400 years in a climatically ultra-sensitive lake in the Niedere Tauern Alps (Austria). *Fundamental and Applied Limnology/Archiv für Hydrobiologie*, *181*(3), 169-181.
- Luoto, T. P., & Nevalainen, L. (2013). Climate-driven limnological changes determine ecological thresholds in an alpine lake. *Aquatic Biology*, *18*(1), 47-58.
- Markovic, D., Carrizo, S., Freyhof, J., Cid, N., Lengyel, S., Scholz, M., ... & Darwall, W. (2014). Europe's freshwater biodiversity under climate change: distribution shifts and conservation needs. *Diversity and Distributions*, *20*(9), 1097-1107.
- Matulla, C., Schmutz, S., Melcher, A., Gerersdorfer, T., & Haas, P. (2007). Assessing the impact of a downscaled climate change simulation on the fish fauna in an Inner-Alpine River. *International journal of biometeorology*, *52*(2), 127-137.
- Mehner, T., Emmrich, M., & Kasprzak, P. (2011). Discrete thermal windows cause opposite response of sympatric cold-water fish species to annual temperature variability. *Ecosphere*, *2*(9), 1-16.
- Mietkiewicz, N., Kulakowski, D., Rogan, J., & Bebi, P. (2017). Long-term change in subalpine forest cover, treeline, and species composition in the Swiss Alps. *Journal of Vegetation Science*. *28*, 951-964.
- Mingozzi, T., Storino, P., Venuto, G., Alessandria, G., Arcamone, E., Urso, S., ... & Massolo, A. (2013). Autumn migration of Common Cranes *Grus grus* through the Italian Peninsula: new vs. historical flyways and their meteorological correlates. *Acta Ornithologica*, *48*(2), 165-177.
- Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. (2011). *Breve guida alla Strategia Nazionale per la Biodiversità*.
- Mura, G., & Rossetti, G. (2002). On the rediscovery of *Chirocephalus ruffoi* Cottarelli & Mura, 1984 in temporary pools of the Secchia and Panaro valleys (Tuscan-Emilian Apennines, northern Italy)(Branchiopoda, Anostraca). *Crustaceana*, *75*(8), 969-977.
- Oertli, B., Indermuehle, N., Angélibert, S., Hinden, H., & Stoll, A. (2008). Macroinvertebrate assemblages in 25 high alpine ponds of the Swiss National Park (Cirque of Macun) and relation to environmental variables. *Hydrobiologia*, *597*(1), 29-41.
- Paerl, H. W., & Huisman, J. (2009). Climate change: a catalyst for global expansion of harmful cyanobacterial blooms. *Environmental microbiology reports*, *1*(1), 27-37.
- Parmesan, C. (2006). Ecological and evolutionary responses to recent climate change. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, *37*, 637-669.
- Posch, T., Köster, O., Salcher, M. M., & Pernthaler, J. (2012). Harmful filamentous cyanobacteria favoured by reduced water turnover with lake warming. *Nature Climate Change*, *2*(11), 809.
- Providoli, T., & Kuhn, N. J. (2012). Climate and land use effects on forest cover in the Bernese Alps during the 20th century. *Geographica Helvetica*, *67*(1/2), 15-25.
- Reading, C. J. (2007). Linking global warming to amphibian declines through its effects on female body condition and survivorship. *Oecologia*, *151*(1), 125-131.

- Rézouki, C., Tafani, M., Cohas, A., Loison, A., Gaillard, J. M., Allainé, D., & Bonenfant, C. (2016). Socially mediated effects of climate change decrease survival of hibernating Alpine marmots. *Journal of Animal Ecology*, 85(3), 761-773.
- Rubolini, D., Ambrosini, R., Caffi, M., Bricchetti, P., Armiraglio, S., & Saino, N. (2007). Long-term trends in first arrival and first egg laying dates of some migrant and resident bird species in northern Italy. *International journal of biometeorology*, 51(6), 553-563.
- Solheim, A. L., Austnes, K., Eriksen, T. E., Seifert, I., & Holen, S. (2010). Climate change impacts on water quality and biodiversity. *Background Report for EEA European Environment State and Outlook Report*.
- Tafani, M., Cohas, A., Bonenfant, C., Gaillard, J. M., & Allainé, D. (2013). Decreasing litter size of marmots over time: a life history response to climate change?. *Ecology*, 94(3), 580-586.
- Tartari, G., Copetti, D., & Marchetto, A. (2002). Northern Italian lakes: regionalization of limnological features and pressure factors relationships. *Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie: Verhandlungen*, 28(1), 223-227.
- Tartari, G., Marchetto, A., & Copetti, D. (2000). Qualità delle acque lacustri della Lombardia alle soglie del 2000. *Fondazione Lombardia per l'Ambiente. Ricerche & Risultati*, 44, 226.
- Thackeray, S. J., Jones, I. D., & Maberly, S. C. (2008). Long-term change in the phenology of spring phytoplankton: species-specific responses to nutrient enrichment and climatic change. *Journal of Ecology*, 96(3), 523-535.
- Virkkala, R., & Lehikoinen, A. (2017). Birds on the move in the face of climate change: High species turnover in northern Europe. *Ecology and Evolution*, 7(20), 8201-8209.
- Walther, G. R., Post, E., Convey, P., Menzel, A., Parmesan, C., Beebee, T. J., ... & Bairlein, F. (2002). Ecological responses to recent climate change. *Nature*, 416(6879), 389.
- Zierl, B., & Bugmann, H. (2005). Global change impacts on hydrological processes in Alpine catchments. *Water Resources Research*, 41(2).

Chapitre 5

- AA.VV. (2012). Gli incendi boschivi nelle Alpi. Conoscenza, previsione e cooperazione per difendere il nostro patrimonio forestale. Progetto Alp FFIRS, Programma Alpine Space. Rapporto finale
- Bottalico, F., Nocentini, S., & Travaglini D. (2016). Linee guida per la ricostituzione del potenziale forestale nelle aree danneggiate dal vento: il caso dei boschi della Toscana. *L'Italia forestale e montana*. 71, 227-238.
- Colombo, A., & Ramasco, M. (2005). Rapporto sulle frane in Italia. Analisi del dissesto da frana in Piemonte. Torino, ARPA
- Csilléry, K., Kunstler, G., Courbaud, B., Allard, D., Lassegues, P., Haslinger, K., & Gardiner, B. (2017). Coupled effects of wind-storms and drought on tree mortality across 115 forest stands from the Western Alps and the Jura mountains. *Global change biology*.
- Egli, S. (2009). Quale impatto ha per la foresta il declino dei funghi micorrizici? www.waldwissen.net
- Frank, A., Howe, G. T., Sperisen, C., Brang, P., St Clair, J. B., Schmatz, D. R., & Heiri, C. (2017). Risk of genetic maladaptation due to climate change in three major European tree species. *Global change biology*.
- Global Carbon Atlas. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>
- Iovino, F. (2016). Gestione forestale e tutela dal dissesto idrogeologico nei territori montani. Accademia Italiana di Scienze Forestali
- Jump, A. S., Hunt, J. M., & Penuelas, J. (2006). Rapid climate change-related growth decline at the southern range edge of *Fagus sylvatica*. *Global Change Biology*, 12(11), 2163-2174.

- Lindner, M., Garcia-Gonzalo, J., Kolström, M., Green, T., Reguera, R., Maroschek, M., ... & Kremer, A. (2008). Impacts of climate change on European forests and options for adaptation. *Report to the European Commission Directorate-General for Agriculture and Rural Development*, 173.
- Roy, B. A., Güsewell, S., & Harte, J. (2004). Response of plant pathogens and herbivores to a warming experiment. *Ecology*, *85*(9), 2570-2581.
- Vitali, V., Büntgen, U., & Bauhus, J. (2017). Silver fir and Douglas fir are more tolerant to extreme droughts than Norway spruce in south-western Germany. *Global change biology*. *23*, 5108–5119
- Waldboth, M., & Oberhuber, W. (2009). Synergistic effect of drought and chestnut blight (*Cryphonectria parasitica*) on growth decline of European chestnut (*Castanea sativa*). *Forest Pathology*, *39*(1), 43-55.
- World Meteorological Organization. (2017). *Greenhouse Gas Bulletin, 2017*. https://library.wmo.int/opac/doc_num.php?explnum_id=4022

Chapitre 6

- Becken, S. (2013). A review of tourism and climate change as an evolving knowledge domain. *Tourism Management Perspectives*, *6*, 53–62.
- Beniston, M. (2003). Climatic Change in Mountain Regions: A Review of Possible Impacts. *Climatic Change*, *59*(1–2), 5–31.
- Bindi, M., & Olesen, J. E. (2011). The responses of agriculture in Europe to climate change. *Regional Environmental Change*, *11*(1), 151–158.
- Carraro, C., Crimi, J., & Sgobbi, A. (2007). La valutazione economica degli impatti dei cambiamenti climatici in Italia e delle relative misure di adattamento. *Cambiamenti climatici e strategie di adattamento in Italia: una valutazione economica*. Il Mulino, Bologna.
- EC - European Commission. (2009). Adapting to climate change: Towards a European framework for action. White paper. COM(2009), 147/4 final.
- EEA. (2009). Regional climate change and adaptation - The Alps facing the challenge of changing water resources. (Vol. EEA Report). Copenhagen.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—a review. *Science of the Total Environment*, *493*, 1138–1151.
- Hohenwallner, D. (2011). Water Management in a Changing Environment Strategies against Water Scarcity in the Alps. Project Outcomes and Recommendations. Rapporto del progetto Alp-Water-Scarce.
- IPCC. (2001). Third Assessment Report: Climate Change 2001. Impacts, Adaptation and Vulnerability.
- IPCC. (2014). Climate Change 2014—Impacts, Adaptation and Vulnerability: Regional Aspects. Cambridge University Press.
- Lindner, M., Fitzgerald, J. B., Zimmermann, N. E., Reyer, C., Delzon, S., van der Maaten, E., ... van der Maaten-Theunissen, M. (2014). Climate change and European forests: what do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of environmental management*, *146*, 69–83.
- Pütz, M., Gallati, D., Kytzia, S., Elsasser, H., Lardelli, C., Teich, M., ... Rixen, C. (2011). Winter tourism, climate change, and snowmaking in the Swiss Alps: tourists' attitudes and regional economic impacts. *Mountain Research and Development*, *31*(4), 357–362.
- Santamouris, M., Cartalis, C., Synnefa, A., & Kolokotsa, D. (2015). On the impact of urban heat island and global warming on the power demand and electricity consumption of buildings—A review. *Energy and Buildings*, *98*, 119–124.

Serquet, G., & Rebetez, M. (2011). Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108(1), 291–300.

Spinoni, J., Vogt, J. V., Barbosa, P., Dosio, A., McCormick, N., Bigano, A., & Füssler, H. M. (2018). Changes of heating and cooling degree-days in Europe from 1981 to 2100. *International Journal of Climatology*, 38, e191-e208.

Chapitre 7

Abegg, B., Agrawala, S., Crick, F., & de Montfalcon, A. (2007). Climate change impacts and adaptation in winter tourism. In: Agrawala, S. (ed.), *Climate change in the European Alps: Adapting winter tourism and natural hazards management*. Pp. 25-58.

Agrawala, S. (2007). Climate change in the European Alps: adapting winter tourism and natural hazards management. <https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20083318183>

Amelung, B., & Moreno, A. (2012). Costing the impact of climate change on tourism in Europe: results of the PESETA project. *Climatic Change*, 112(1), 83–100.

Amelung, B., & Viner, D. (2006). Mediterranean Tourism: Exploring the Future with the Tourism Climatic Index. *Journal of Sustainable Tourism*, 14(4), 349–366.

Balbi, S. (2012). Climate change and Tourism in the Alps: a position paper in view of the upcoming Alpine Convention Fourth Report on the State of the Alps on Sustainable Tourism. Centro EuroMediterraneo per i Cambiamenti Climatici, Research Papers Issue RP0127.

Becken, S. (2013). A review of tourism and climate change as an evolving knowledge domain. *Tourism Management Perspectives*, 6(Supplement C), 53–62.

Behringer, J., Buerki, R., & Fuhrer, J. (2000). Participatory integrated assessment of adaptation to climate change in Alpine tourism and mountain agriculture. *Integrated Assessment*, 1(4), 331–338.

Elsasser, H., & Bürki, R. (2002). Climate change as a threat to tourism in the Alps. *Climate Research*, 20(3), 253–257.

Elsasser, H., & Messerli, P. (2001). The Vulnerability of the Snow Industry in the Swiss Alps. *Mountain Research and Development*, 21(4), 335–339.

Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment*, 493(Supplement C), 1138–1151.

Hall, C. M. (2008). Tourism and Climate Change: Knowledge Gaps and Issues. *Tourism Recreation Research*, 33(3), 339–350.

Hamilton, J. M., Maddison, D. J., & Tol, R. S. J. (2005). Climate change and international tourism: A simulation study. *Global Environmental Change*, 15(3), 253–266.

Hantel, M., & Hirtl-Wielke, L.-M. (2007). Sensitivity of Alpine snow cover to European temperature. *International Journal of Climatology*, 27(10), 1265–1275.

Hohenwallner, D. (2011). Water Management in a Changing Environment Strategies against Water Scarcity in the Alps. Project Outcomes and Recommendations. Report del progetto Alp-Water-Scarce.

Koenig, U., & Abegg, B. (1997). Impacts of Climate Change on Winter Tourism in the Swiss Alps. *Journal of Sustainable Tourism*, 5(1), 46–58.

Lise, W., & Tol, R. S. J. (2002). Impact of Climate on Tourist Demand. *Climatic Change*, 55(4), 429–449.

Machiavelli, A. (2011). La montagna nel turismo italiano. In: Becheri, E., Maggiore, G. (a cura di), *Rapporto sul turismo italiano 2010-2011*. Milano: FrancoAngeli, pp. 499-520.

- Mieczkowski, Z. (1985). The tourism climatic index: A method of evaluating world climates for tourism. *The Canadian Geographer / Le Géographe Canadien*, 29(3), 220–233.
- Müller, H., & Weber, F. (2008). Climate change and tourism – scenario analysis for the Bernese Oberland in 2030. *Tourism Review*, 63(3), 57–71.
- Pütz, M., Gallati, D., Kytzia, S., Elsasser, H., Lardelli, C., Teich, M., ... Rixen, C. (2011). Winter Tourism, Climate Change, and Snowmaking in the Swiss Alps: Tourists' Attitudes and Regional Economic Impacts. *Mountain Research and Development*, 31(4), 357–362.
- Rixen, C., Teich, M., Lardelli, C., Gallati, D., Pohl, M., Pütz, M., & Bebi, P. (2011). Winter Tourism and Climate Change in the Alps: An Assessment of Resource Consumption, Snow Reliability, and Future Snowmaking Potential. *Mountain Research and Development*, 31(3), 229–236.
- Serquet, G., & Rebetez, M. (2011). Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperatures associated with climate change. *Climatic Change*, 108(1-2), 291–300.
- Steiger, R. (2010). The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research*, 43(3), 251–262.
- Steiger, R., & Mayer, M. (2008). Snowmaking and Climate Change. *Mountain Research and Development*, 28(3/4), 292–298.
- Unbehaun, W., Pröbstl, U., & Haider, W. (2008). Trends in winter sport tourism: challenges for the future. *Tourism Review*, 63(1), 36–47.
- Urbanc M., Pipan P. (ed.) (2011). *ClimAlpTour. Il cambiamento climatico e i suoi impatti sul turismo nello spazio alpino*. Ljubljana: Zalozba.
- Wipf, S., Rixen, C., Fischer, M., Schmid, B., & Stoeckli, V. (2005). Effects of ski piste preparation on alpine vegetation. *Journal of Applied Ecology*, 42(2), 306–316.
- Wolfsegger, C., Gössling, S., & Scott, D. (2008). Climate change risk appraisal in the Austrian ski industry. *Tourism Review International*, 12(1), 13–23.

Chapitre 8

- Costanza, R., Wilson, M., Troy, A., Voinov, A., Liu, S., & D'Agostino, J. (2006). *The value of New Jersey's Ecosystem Services and Natural Capital*. Gund Institute for Ecological Economics, University of Vermont, Burlington
- Scolozzi, R., Morri, E., & Santolini, R. (2012). Delphi-based change assessment in ecosystem service values to support strategic spatial planning in Italian landscapes. *Ecological Indicators*, 21, 134–144.

Chapitre 9

- Chaix, C. (2018, mars). Bilan climatique hiver 2017-2018. <http://www.mdp73.fr/index.php/10-les-observatoires/observatoire-savoie-du-changement-climatique/20-les-bilans-climatiques-de-l-observatoire>
- Chambre d'agriculture Savoie Mont Blanc, & SIAC. (2014). *Projet agro-environnemental et climatique du Chablais* (p. 71). <https://www.siac-chablais.fr/documentation/agriculture-et-foret/843-paec-du-chablais-dossier-de-candidature-oct-2014/file>
- DREAL Auvergne-Rhône-Alpes. (2018). Situation hydrologique - Station : Reyvroz [bioge] (V0334010) - Cours d'eau : La Dranse. <https://www.rdbmrc.com/hydroreel2/station.php?codestation=1062>
- EPODE, BLEZAT, AGRESTIS, CICAL, NICOT, & CDMF. (2017). Plan Local d'urbanisme intercommunal CCHC - Rapport de présentation Tome 1 (p. 106).

Groupe d'Action Locale du Chablais. (2015). L'innovation au service de la ressource forestière - Programme LEADER 2014-2020 - Réponse à l'appel à manifestation d'intérêt (p. 74). Thonon-les-Bains: SIAC. <https://www.siac-chablais.fr/documentation/leader-1/candidature-leader-20172020/925-01-dossier-de-candidature-leader-2014-2020/file>

Hubert, P., Marin, E., Meybeck, M., Olive, P., & Siwertz, E. (1969). Aspects hydrologique, géochimique et sédimentologique de la crue exceptionnelle de la Dranse du Chablais du 22 Septembre 1968. *Archives des Sciences*, 22(3), 581-604.

ORECC Auvergne-Rhône-Alpes. (2017). *Changement climatique et tourisme en Auvergne-Rhône-Alpes - Températures, enneigement et fréquentation des domaines skiables* (p. 31). http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orecc/Documents/Donnees_territoriales/Indicateurs/ORECC_2017_IND_TOUR_1_2_Fiche_Temp_Neige_vff.pdf

ORECC Auvergne-Rhône-Alpes. (2018a). *Le changement climatique en Auvergne-Rhône-Alpes Profil climat territorial - Territoire : CA Thonon Agglomération* (p. 10). http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orecc/Documents/Donnees_territoriales/Profils_EPCL/Fiche_CA_Thonon_Agglomeration.pdf

ORECC Auvergne-Rhône-Alpes. (2018b). *Le changement climatique en Auvergne-Rhône-Alpes Profil climat territorial - Territoire : CC Pays d'Évian Vallée d'Abondance* (p. 10). http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orecc/Documents/Donnees_territoriales/Profils_EPCL/Fiche_CC_Pays_d_Evian_Vallee_d_Abondance.pdf

RAEE, & CCHC. (2015). La chaîne d'impacts associés au changement climatique sur le territoire de la CCHC.

Sérès, C. (2010). Changement climatique et agriculture d'élevage en zone de montagne : premiers éléments de réflexion. *Courrier de l'environnement de l'INRA*, p. 21-37.

SIAC. (2012a). *SCOT - Tome 1 bis - Rapport de présentation - Diagnostic et EIE* (p. 428). Thonon. <https://siac-chablais.fr/documentation/scot-dossier-officiel/le-scot-du-chablais-approuve-le-23-02-2012/367-2-scot-approuve-tome-1bis-diagnostic-et-etat-initial-de-l-environnement-26-mo/file>

SIAC. (2012b). *SCOT - Tome 2 - Projet d'aménagement et de développement durable* (p. 20). <https://siac-chablais.fr/documentation/scot-dossier-officiel/le-scot-du-chablais-approuve-le-23-02-2012/364-6-scot-approuve-tome-2-padd-6-5-mo/file>

SIAC. (2016a). Révision du Schéma de Cohérence Territoriale (SCoT) du Chablais - Haute-Savoie Projet d'Aménagement et de Développement Durables – PADD. <https://siac-chablais.fr/documentation/scot-en-revision/1193-01-padd-du-scot-debattu-le-24-novembre-2016/file>

SIAC. (2016b, juin). *Les collectivités membres du SIAC au 01/01/2017*. <https://siac-chablais.fr/documentation/siac-administration-generale/statuts-et-perimetre/565-carte-des-collectivites-membres-du-siac/file>

SIAC. (2017a). *Contrat de rivières des Dranses et Est Lémaniques 2017 - 2022 - Fascicule A - Document contractuel* (p. 38). <https://www.siac-chablais.fr/documentation/contrat-de-rivieres/dossier-du-contrat-de-rivieres-des-dranses-et-de-l-est-lemanique/1374-dossier-definitif-contrat-de-rivieres-fascicule-a-document-contractuel/file>

SIAC. (2017b). *La révision du SCoT lancée en 2015*. <https://siac-chablais.fr/amenager-scot/scot-en-revision>

SIAC. (2017c). *Projet de contrat de rivière des Dranses / Est lémanique 2017-2022 - Fascicule B - Etat des lieux et diagnostic* (p. 126). Thonon-les-Bains. <https://www.siac-chablais.fr/documentation/contrat-de-rivieres/dossier-du-contrat-de-rivieres-des-dranses-et-de-l-est-lemanique/1375-dossier-definitif-contrat-de-rivieres-fascicule-b-etat-des-lieux-et-diagnostic/file>

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., & Morin, S. (2017). Multi-components ensembles of future meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps. *The Cryosphere Discussions*, 1-36.

Chapitre 10

Chaix, C. (2016). *Rivières 2015/2016 - Débits du Chéran* (Les notes de l'Observatoire - Impacts n°18). Observatoire Savoyard du Changement Climatique dans les Alpes du Nord. <http://www.mdp73.fr/index.php/publications/category/8-impacts-du-changement-climatique?download=266:impacts>

Chambéry métropole - mission développement durable. (2016). Territoire à énergie positive - La transition énergétique sur le territoire des agglomérations de Chambéry et d'Annecy et du Parc naturel régional du massif des Bauges. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/agir/que-fait-parc/developper-territoire/energie-eco-construct-mobil/tepos/20161125_dossier_presentation_TEPOS.pdf

Communauté de communes Cœur de Savoie. (2016). Territoire à énergie positive : Un programme ambitieux pour un territoire audacieux. Montmélian.

ORECC Auvergne-Rhône-Alpes. (2018). Le changement climatique en Auvergne-Rhône-Alpes Profil climat territorial - Territoire : CA Chambéry Métropole - Cœur des Bauges. http://orecc.auvergnerhonealpes.fr/fileadmin/user_upload/mediatheque/orecc/Documents/Donnees_territoriales/Profils_EPCI/Fiche_CA_Chambéry_Metropole-Coeur_des_Bauges.pdf

PNR du Massif des Bauges. (2006a). *Nouvelle Charte 2007-2019 - Rapport d'orientations opérationnelles*. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/mediatheque/votre_parc/PNRMB%20Charte%202007_2019%20Rap%20Orient%20operationnelles.pdf

PNR du Massif des Bauges. (2006b). *Nouvelle Charte 2007-2019 - Rapport d'orientations stratégiques*. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/mediatheque/votre_parc/PNRMB%20Charte%202007_2019%20Rap%20Orient%20strategiques.pdf

PNR du Massif des Bauges. (2009). *Charte forestière de territoire du massif des Bauges 2009-2013*. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/agir/que-fait-parc/developper-territoire/foret-et-filiere-bois/pdf/_CFT_Massif_des_Bauges_2009-2013.pdf

PNR du Massif des Bauges. (2014a). *Leader 2014 / 2020 Appel à manifestation d'intérêt - Candidature du Massif des Bauges*. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/menu-bas-page/programme-leader/pdf/GAL_DU_MASSIF_DES_BAUGES_-_CANDIDATURE_LEADER_2014-2020-light.pdf

PNR du Massif des Bauges. (2014b). Plan Climat Énergie Territoire - Livre blanc pour prendre en compte les effets du changement climatique et lutter contre les émissions de gaz à effet de serre sur le territoire du Parc naturel régional du Massif des Bauges (p. 100).

PNR du Massif des Bauges. (2015). *Révision de la candidature Espace Valléen - Proposition de nouveaux axes stratégiques*. http://www.parcdesbauges.com/images/contenus/mediatheque/tourisme/candidature_espace_v_101_115.pdf

PNR du Massif des Bauges. (s. d.). *Agriculture*. <http://www.parcdesbauges.com/fr/agir/que-fait-le-parc/developper-le-territoire/agriculture.html#.WzJai3pPOR>

Union Européenne, Région PACA, & Région Aura. (2015). APPEL A PROJETS - Programme Opérationnel Interrégional FEDER du Massif des Alpes- (Axe 1/OS 1) « Protéger et valoriser les ressources alpines pour un développement durable des territoires de Montagne » - INGENIERIE ESPACES VALLEENS. http://www.isere.gouv.fr/content/download/21938/148310/file/AAP_POIA_Ingenierie_Espaces_Valleens_01.pdf

Verfaillie, D., Lafaysse, M., Déqué, M., Eckert, N., Lejeune, Y., & Morin, S. (2017). Multi-components ensembles of future meteorological and natural snow conditions in the Northern French Alps. *The Cryosphere Discussions*, 1-36.

Chapitre 11

ARPA. (2017). Relazione sullo Stato dell'Ambiente in Piemonte

Bovo, S., Cagnazzi, B., De Luigi, C., Lattuca, L., Paesano, G., Pelosini, R., ... & Provenzale, A. (2011). Cinquant'anni di dati meteo-climatici in Piemonte - Temperatura e Precipitazioni giornaliere (1958-2009) - Integrazioni sul territorio. Analisi statistiche e Confronti storici. Arpa Piemonte

Bovo, S., Cordola, M., Pelosini, R., Nicoletta, M., Ronchi, C., & Turroni, E. (2008). L'innevamento naturale delle Alpi piemontesi e le condizioni meteorologiche favorevoli alla produzione di neve programmata. Arpa Piemonte

Cagnazzi, B., Cremonini, R., De Luigi, C., Loglisci, N., Paesano, G., Ronchi, C., ... & Cesare, M. R. (2007). Piemonte Il Piemonte nel Cambiamento climatico osservazioni passate, impatti presenti e strategie future. ARPA Piemonte

Cane, D., De Luigi, C., Ronchi, C., Paro, L., Borasi, L., Maffiotti, A., ... & Pelosini, A. (2011). *Il cambiamento climatico: le attività di Arpa Piemonte su stato, impatti e risposte*. Arpa Piemonte.

Ciccarelli, N., Von Hardenberg, J., Provenzale, A., Ronchi, C., Vargiu, A., & Pelosini, R. (2008). Climate variability in north-western Italy during the second half of the 20th century. *Global and Planetary Change*, 63(2-3), 185-195.

Di Napoli, G., & Mercalli, L. (2008). *Il clima di Torino: tre secoli di osservazioni meteorologiche*. SMS-Società Meteorologica Subalpin.

Fратиани, S., Brunatti, S., Acquotta, F., & Cordola, M. (2010). Contributo allo studio del cambiamento climatico sulle Alpi Occidentali: il caso della Valle Maira. *Neve e Valanghe*, 69, 20-25.

Mercalli, L., Cat Berro, D., Acordon, V., & Di Napoli, G. (2008). Cambiamenti climatici sulla montagna piemontese. *Rapporto tecnico realizzato per la Società meteorological Subalpina*, 143.

Pannocchia, A., Penon, A., Nappi, P., & Converso, C. (2013), *Lo Stato dell'Ambiente del Pinerolese*. Arpa Piemonte

Rivella, E. (2016). Risposte biologiche al cambiamento climatico, monitoraggio e adattamento della biodiversità regionale. Arpa Piemonte

Robotto, A. (2016), *Cambiamenti climatici in Piemonte*. Arpa Piemonte

Booklet 1

Etat de l'art des impacts du changement climatique dans la région alpine

ARTACLIM, Adaptation et résilience des territoires alpins face au changement climatique www.artaclim.eu, est un projet transfrontalier de recherche – action dont l'objectif principal est de favoriser l'introduction de mesures d'adaptation au changement climatique dans le cadre de la programmation et de

Sous la direction de: Politecnico di Torino - DIST (coordinateur de l'activité), Université de Grenoble - Envirhonalp – PARN, SEAcoop, iiSBE Italia R&D.

Edition et design graphique : iiSBE Italia R&D – ESDesigner

Date de publication : juillet 2018

© 2017 Partenariat ARTACLIM. Tous droits réservés. Le projet ARTACLIM (nr. 1316) a reçu un cofinancement du FEDER dans le cadre du programme INTERREG ALCOTRA 2014-2020. Le document reflète le point de vue des auteurs. Le Programme ALCOTRA n'est pas responsable de l'usage qui pourrait être fait des informations issues du rapport.