



SCHEMA D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX DU BASSIN VERSANT DE L'ARVE

ETAT INITIAL

RAPPORT ANNEXE SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE : ETAT DES CONNAISSANCES ET ANALYSE CONTEXTUELLE DE LA SENSIBILITE DE LA RESSOURCE EN EAU SUR LE PERIMETRE DU SAGE

VERSION FINALE

Affaire 08A 157 suivie par : Magali PAULHAN, Ségolène FORESTIER, Camille CHENAUD



SEPIA CONSEILS • 53, rue de Turbigo-75003 PARIS France

☎ : +33 1 53 01 92 95 • fax : +33 1 42 71 85 24 • e-mail : sepia@sepia-conseils.fr • <http://www.sepia-cor>

S.A.S. au capital de 50 000 € - R.C.S. Paris B 382 310 761 - NAF 7112B • Siret 382 310 761 00046 • N° Identification T



SOMMAIRE

INTRODUCTION	7
LISTE DES ABREVIATIONS	9
I ETAT DES CONNAISSANCES SUR LE CHANGEMENT CLIMATIQUE	10
I.1 ORGANISATION ET MISSIONS DES PRINCIPAUX ACTEURS	10
<i>I.1.1 A l'échelle internationale : le GIEC et l'OCDE</i>	<i>10</i>
I.1.1.a Le GIEC	10
I.1.1.b L'OCDE.....	11
<i>I.1.2 A l'échelle nationale : l'ONERC et le MEEDDM</i>	<i>11</i>
<i>I.1.3 A l'échelle de la montagne : le CNRM, l'ANEM et les projets de recherche locaux</i> ..	<i>12</i>
I.1.3.a Le CNRM.....	12
I.1.3.b L'ANEM.....	13
I.1.3.c Projets de recherche	14
<i>I.1.4 Synthèse des acteurs impliqués et des échelles concernées</i>	<i>15</i>
I.2 PRINCIPALES PUBLICATIONS DE REFERENCE	16
<i>I.2.1 Sur la prévision de l'évolution climatique et l'exploitation des modèles climatiques</i> 16	
<i>I.2.2 Sur les impacts du changement climatique</i>	<i>17</i>
I.2.2.a Impacts sur le cycle de l'eau	17
I.2.2.b Impacts sur la neige et ses usages, les ressources en eau et la biodiversité en montagne ...	18
I.2.2.c Impacts sur les risques	19
<i>I.2.3 Sur les mesures d'atténuation, les stratégies d'adaptation et les impacts socio-économiques</i>	<i>19</i>
I.2.3.a ONERC	19
I.2.3.b MEEDDM.....	20
I.2.3.c OCDE	20
I.2.3.d ANEM.....	21
I.2.3.e Etudes locales	22
I.3 HYPOTHESES D'EVOLUTION DU SYSTEME CLIMATIQUE	22
<i>I.3.1 Scénarios d'émissions</i>	<i>22</i>
I.3.1.a Présentation des scénarios d'émissions du GIEC.....	22
I.3.1.b Projections d'émissions et de concentrations atmosphériques en CO ₂ associées	24
I.3.1.c Autres scénarios d'émissions	26
<i>I.3.2 Modélisations climatiques</i>	<i>26</i>
I.3.2.a A l'échelle mondiale.....	26
I.3.2.b A une échelle plus fine d'analyse.....	28
<i>I.3.3 Résultats des simulations d'évolution du système climatique</i>	<i>30</i>
I.3.3.a A l'échelle du monde	30
I.3.3.b A l'échelle de l'Europe.....	32
I.3.3.c A l'échelle de la France et des Alpes Françaises	34
I.3.3.d Synthèse sur les résultats des simulations d'évolution du système climatique.....	40
<i>I.3.4 Résultats à venir</i>	<i>40</i>
I.4 CONSEQUENCES POTENTIELLES EN MILIEU MONTAGNARD	41
<i>I.4.1 Impacts potentiels du changement climatique sur les phénomènes naturels</i>	<i>41</i>
I.4.1.a Modifications des précipitations et impacts sur la ressource en eau, l'enneigement et les crues	42
I.4.1.b Modifications glaciaires et impacts sur les avalanches	44
I.4.1.c Modifications glaciaires et impacts sur les laves torrentiels et les crues	45

Rapport annexe sur le changement climatique : état des connaissances et analyse contextuelle de la sensibilité du tourisme d'hiver et de la ressource en eau sur le périmètre du SAGE

1.4.1.d	Modifications de la température et impacts sur les feux de forêt	46
1.4.1.e	Modifications de la température, des précipitations et des processus glaciaires et impacts sur les mouvements de terrain	47
1.4.2	Impacts potentiels d'un changement climatique sur les milieux naturels	48
1.4.2.a	Espaces et espèces naturels en milieu terrestre.....	49
1.4.2.b	Espaces et espèces naturels en milieu aquatique	51
1.4.2.c	Synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur les milieux naturels.....	52
1.4.3	Impacts potentiels d'un changement climatique sur les activités socio-économiques	52
1.4.3.a	Activités forestières	52
1.4.3.b	Activités agricoles.....	53
1.4.3.c	Activités touristiques	55
1.4.3.d	Synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur les activités socio-économiques	56
II	ANALYSE CONTEXTUELLE : REFLEXIONS SUR DES CONSEQUENCES POTENTIELLES SUR LA RESSOURCE EN EAU DU TERRITOIRE DU SAGE.....	57
II.1	PLUVIOMETRIE, REGIMES HYDROLOGIQUES ET DEBITS DES COURS D'EAU	58
II.1.1	Régime pluviométrique actuel.....	58
II.1.2	Régimes hydrologiques et débits associés actuels	58
II.2	PRELEVEMENTS EN EAU SUR LE TERRITOIRE DU SAGE	58
II.3	EVOLUTION POTENTIELLE DES PRECIPITATIONS, DE LA TEMPERATURE ET DES REGIMES HYDROLOGIQUES DANS LE CONTEXTE D'UN CHANGEMENT CLIMATIQUE	59
II.3.1	Gestion de l'incertitude	59
II.3.2	Simulations d'évolution de la pluviométrie sur le territoire de l'Arve.....	60
II.3.3	Conséquences de l'évolution potentielle simultanée de la pluviométrie et de la température	61
II.3.4	Etude de l'hydrologie des rivières de régimes nival et nivo-pluvial	64
II.4	DISPONIBILITE DE LA RESSOURCE EN EAU ET SATISFACTION DES PRINCIPAUX USAGES DE L'EAU	66
II.4.1	Evolution de la ressource en eau dans le bassin amont.....	66
II.4.2	Evolution de la ressource en eau dans le bassin intermédiaire et dans les parties hautes du bassin aval	67
II.4.3	Evolution de la ressource en eau dans les parties basses du bassin aval	67
II.4.4	Impacts quantitatifs potentiels sur les principaux usages socio-économiques de l'eau	68
II.4.5	Evolution possible de la demande.....	69
II.5	SYNTHESE SUR LES IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE SUR LA RESSOURCE EN EAU.....	70
II.6	ELEMENTS DE REFLEXION POUR APPROFONDIR L'ANALYSE	70
III	DEMARCHES ENGAGEES POUR L'ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE A L'ECHELLE DES ALPES	72
CONCLUSION	73
BIBLIOGRAPHIE	75
ANNEXES	78

FIGURES

Figure 1 : Représentation schématique des 4 familles de scénarios d'émissions du SRES.....	23
Figure 2 : Simulation d'évolution des émissions globales annuelles de CO ₂ de 1990 à 2100 pour les différentes familles de scénarios d'émissions du SRES, en gigatonnes de carbone par an (GtC/yr).	25
Figure 3 : Simulation d'évolution des températures globales de surface au cours du XXI ^{ème} siècle pour chaque famille de scénarios d'émissions du SRES	31
Figure 4 : Simulation d'évolution de la température de surface en Europe au cours des XX ^{ème} et XXI ^{ème} siècles pour 3 scénarios du SRES.....	33
Figure 5 : Simulation d'évolution de la température (en haut) et des précipitations (en bas) en Europe sur la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999, pour le scénario d'émissions A1B, en moyenne annuelle, hivernale (DJF) et estivale (JJA)	34
Figure 6 : Simulation de la répartition sur la France de la température moyenne hivernale (en °C)	36
Figure 7 : Simulation de la répartition sur la France des précipitations moyennes annuelles (en mm/jour).....	37
Figure 8 : Simulation de l'évolution de la température moyenne hivernale de 1960 à 2100, pour les scénarios A2 et B2	39
Figure 9 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'enneigement, la disponibilité de la ressource en eau et le risque de crue	42
Figure 10 : Changement relatif en % des débits en 2050 par rapport à 1970-2000	43
Figure 11 : Impacts potentiels du changement climatique sur les aléas glaciaires et les avalanches	44
Figure 12 : Impacts potentiels du changement climatique sur les aléas torrentiels et les crues	45
Figure 13 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur le risque de feux de forêt.....	46
Figure 14 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les mouvements de terrain	47
Figure 15 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces végétales et les risques associés.....	49
Figure 16 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces animales et végétales et sur la biodiversité	49
Figure 17 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces et les milieux aquatiques	51
Figure 18 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur la gestion sylvicole	52
Figure 19 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les cultures	53
Figure 20 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'activité d'élevage.....	54
Figure 21 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'attractivité des différents types de tourisme.....	55

Figure 22 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur des composantes majeures du secteur touristique	55
Figure 23 : Simulation d'évolution des précipitations hivernales moyennes pour les scénarios d'émissions A2 et B2	60
Figure 24 : Simulation d'évolution des précipitations estivales moyennes pour les scénarios d'émissions A2 et B2	61
Figure 25 : Détail des impacts potentiels d'une augmentation de la température moyenne de l'air sur l'enneigement à haute, moyenne et basse altitudes	62
Figure 26 : Simulation d'évolution de la température moyenne annuelle de l'air pour les scénarios d'émissions A2 et B2	63
Figure 27 : Principaux impacts potentiels d'une augmentation de la température moyenne de l'air sur l'hydrologie des rivières de régime nival et disponibilité en eau associée	65

TABLEAUX

Tableau 1 : Synthèse sur les principaux niveaux et acteurs de la réflexion sur le changement climatique	16
Tableau 2 : Estimation de l'évolution des températures de surface et du niveau de la mer d'ici la fin du XXI ^{ème} siècle, selon les 6 scénarios de référence du SRES et un scénario simple d'émissions. 32	
Tableau 3 : Synthèse des impacts potentiels d'un changement climatique sur les risques naturels dans le massif alpin selon le degré de confiance accordé aux projections	48
Tableau 4 : Synthèse des régimes hydrologiques du territoire de l'Arve.....	58

ANNEXES

Annexe 1 : Propositions d'adaptation effectuées par l'ANEM lors de son 23 ^{ème} congrès.....	78
Annexe 2 : Carte des 210 mailles formant la grille du simulateur de l'ONERC et des 3 mailles couvrant le territoire de l'Arve	79
Annexe 3 : Liste des 34 domaines skiables du territoire de l'Arve.....	80

Introduction

Le présent document est un rapport annexe associé au rapport d' « Etat initial » du SAGE.

Le changement climatique est un thème qui a déjà fait l'objet de nombreuses réflexions à l'échelle nationale mais également à l'échelle des Alpes. En tant qu'outil de planification, le SAGE comporte une forte dimension prospective. Il peut permettre d'anticiper certaines évolutions et leurs impacts sur la ressource et les milieux, en les identifiant puis en formulant des réponses adaptées au territoire. Un volet spécifique au changement climatique a donc été intégré à l'état initial afin d'évaluer dans quelle mesure il sera une problématique sur le périmètre du SAGE.

Le rapport est organisé en 3 parties :

- × la première présente un état des lieux des connaissances sur la question du changement climatique à différentes échelles, du monde aux Alpes du Nord. En effet, la bibliographie sur le sujet est riche et de nombreux acteurs sont impliqués de diverses façons dans la réflexion. La 1^{ère} partie recense donc les acteurs impliqués dans les réflexions actuelles, les études les plus pertinentes (en termes de validation scientifique et au regard de l'« Etat Initial » du SAGE) et les conclusions auxquelles elles aboutissent, identifie les incertitudes, notamment à une échelle fine d'analyse, et met en évidence les éventuelles limites des travaux effectués et les pistes encore peu explorées.
- × la deuxième partie présente une analyse contextuelle de la littérature à la lumière des caractéristiques du territoire dans le domaine de la ressource en eau. Cette analyse, fondée sur les scénarios climatiques et les scénarios d'impacts disponibles dans la littérature et sur la notion de confiance plus ou moins grande accordée à chaque scénario, permet d'estimer les évolutions potentielles sur le territoire de l'Arve et d'identifier des enjeux particuliers. Ces éléments permettront à la CLE de s'interroger sur les impacts potentiels du changement climatique sur le territoire du SAGE, sur la place que pourrait occuper cette question au sein du futur SAGE.
- × la 3^{ème} partie recense les initiatives et démarches d'ores et déjà engagées pour définir et mettre en œuvre des mesures d'adaptation au changement climatique en France et dans les Alpes. Elle dresse un bilan des pistes de réflexion pouvant alimenter le futur SAGE pour une planification à moyen et plus long terme, dans les domaines de la gestion mais aussi de la connaissance (études complémentaires à mener).

L'objectif de ce rapport n'est pas de s'interroger sur l'existence, ou non, d'un changement climatique, ni sur le rôle joué par les activités humaines dans ce phénomène. Il part de

l'hypothèse d'un changement climatique effectif et des scénarios d'évolution actuellement disponibles afin d'évaluer les implications possibles sur le territoire d'étude. La question de l'atténuation du phénomène de changement climatique, notamment par la réduction des émissions de gaz à effet de serre, n'est pas non plus l'objet de ce rapport et n'est donc pas abordée.

Ce rapport constitue une base de connaissance et d'aide à la réflexion sur la thématique du changement climatique en général et ses implications potentielles sur le territoire de l'Arve. Il se veut le plus exhaustif et actualisé possible, mais est néanmoins voué à une évolution et un enrichissement constants du fait de l'important travail de recherche mené en permanence sur la question du changement climatique.

Le présent rapport est illustré de figures et fait référence à des chapitres et illustrations du rapport d'état initial et de l'Atlas cartographique associé.

Liste des abréviations

- ANEM : Association Nationale des Elus de Montagne
- AOGCM : Atmospheric-Ocean General Circulation Model, ou Modèle de Circulation Générale Couplé Océan-Atmosphère
- CEN : Centre d'Etude de la Neige
- CERFACS : Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
- CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques
- CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
- CO₂ : Dioxyde de carbone
- DCE : Directive Cadre sur l'Eau
- DDAF : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt
- GES : Gaz à Effet de Serre
- GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GMGEC : Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat
- IPSL : Institut Pierre Simon Laplace
- IRD : Institut de Recherche pour le Développement
- LGGE : Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement
- MEEDDM : Ministère de l'Environnement, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer
- MGC : Modèle Général du Climat
- OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economiques
- ONERC : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'Outre mer
- PGRN : Pôle Grenoblois Risques Naturels
- PNP : Production Nette Primaire
- RCM : Regional Climate Model, ou Modèle Climatique Régional
- SCAMPEI : Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes Extrêmes, enneigement et Incertitudes
- SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
- SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
- SIDEAU : Système d'Information Départemental sur l'EAU
- SEIGAD : Systèmes Environnementaux, Information Géographique et Aide à la Décision
- SM3A : Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords
- SO₂ : Dioxyde de soufre
- SPAGE : Schéma de Protection, d'Aménagement et de Gestion des Eaux
- SRES : Special Report on Emission Scenarios
- UR : Unité de Recherche

I Etat des connaissances sur le changement climatique

Cette partie expose les différents niveaux de réflexion et les principaux acteurs associés, afin de fournir une vision relativement complète de la bibliographie disponible sur la question du changement climatique, de ses impacts et des mesures à mettre en œuvre pour s'adapter. Cette bibliographie dresse un bilan des données utilisées pour l'analyse des conséquences potentielles sur le territoire du SAGE dans le domaine du tourisme d'hiver et de la ressource en eau (cf. II p57).

I.1 Organisation et missions des principaux acteurs

I.1.1 A l'échelle internationale : le GIEC et l'OCDE

I.1.1.a Le GIEC

Le Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) est un acteur majeur de la réflexion sur le changement climatique. Il a été créé à la fin des années 1980¹, à une époque où la communauté internationale commence à considérer le phénomène de changement climatique comme un enjeu à l'échelle du globe, pour réaliser des missions d'expertise sur la question au niveau mondial.

Il évalue l'information scientifique, technique et socio-économique relative à l'évolution du climat et notamment la façon dont les activités humaines peuvent à la fois causer de tels changements et en subir les effets. Le GIEC n'entreprend donc pas de travaux de recherche, mais établit des documents de synthèse, afin d'obtenir une vision globale du phénomène de changement climatique (Loubier J.C., 2004).

Il rassemble pour cela environ 2 500 membres de la communauté scientifique mondiale, qui reprennent les résultats d'études qui leur semblent aujourd'hui les plus réalistes et marquées par le plus fort degré de certitude. Il peut s'agir d'études globales mais aussi de travaux de recherche menés sur des domaines précis ou à des échelles temporelle et spatiale réduites. Dans cette démarche d'expertise, le GIEC s'est structuré en 3 groupes de travail (www.ipcc.ch) :

- * le Groupe de travail I étudie les aspects scientifiques du système climatique et de son évolution,

¹ Le GIEC a été créé en 1988 par l'Organisation Météorologique Mondiale et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement.

- ✗ le Groupe de travail II s'intéresse à la vulnérabilité des systèmes socio-économiques et naturels, aux incidences négatives mais aussi positives des évolutions climatiques et aux possibilités de s'y adapter,
- ✗ le Groupe de travail III examine les possibilités de limiter les émissions de gaz à effet de serre (GES) ou d'atténuer de toute autre manière le changement climatique.

Les rapports d'évaluation du GIEC sont actuellement la référence sur l'état de l'art admis en matière de changement climatique global et pour les négociations internationales sur les émissions de GES.

I.1.1.b L'OCDE

Le réchauffement climatique qui s'opère à l'échelle planétaire aura des conséquences pour les économies, les sociétés et l'environnement. L'évaluation de ces impacts est un axe de réflexion clef en termes de stratégies de développement économique et de politiques sectorielles, et donc un sujet de recherche pertinent pour l'Organisation de Coopération et de Développement Economiques (OCDE). Le travail de l'OCDE par rapport au changement climatique porte essentiellement sur les questions d'atténuation du phénomène et d'adaptation vis-à-vis de celui-ci. L'objectif de l'OCDE est d'aider les gouvernements à identifier et à mettre en œuvre les politiques de réduction des émissions de GES les moins coûteuses, ainsi qu'à intégrer la notion d'adaptation dans leurs différents domaines d'intervention.

L'une des voies privilégiées par l'OCDE pour la diffusion de ses travaux est la publication d'ouvrages thématiques. Les rapports de l'OCDE sur le changement climatique fournissent des informations actualisées selon un angle d'approche essentiellement économique. Alliant évaluation et recommandations, ils sont régulièrement cités en référence, d'autant que la question de l'adaptation devient une composante de plus en plus nécessaire à toute réflexion sur le sujet.

I.1.2 A l'échelle nationale : l'ONERC et le MEEDDM

L'Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique (ONERC) en France métropolitaine et dans les départements et territoires d'Outre mer (ONERC)² a été créé au début du XXI^{ème} siècle.

Il a pour mission principale de collecter et diffuser les informations, études et recherches sur les risques liés au réchauffement climatique et aux phénomènes climatiques extrêmes.

² L'ONERC est créé par la loi du 19 février 2001, qui tend à faire de la lutte contre l'effet de serre et de la prévention des risques liés au réchauffement climatique une priorité nationale.

C'est en quelque sorte le pendant national du GIEC. Il recense, dans ce but, les activités de différents organismes opérationnels et de recherche : Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS), Météo-France, Institut de Recherche pour le Développement (IRD), etc. (Source : www.ecologie.gouv.fr). L'ONERC axe son action sur les effets actuels et à venir du changement climatique.

Il assure également dans ce cadre une seconde mission, qui est de formuler des recommandations sur les mesures de prévention et d'adaptation à envisager.

L'ONERC est un organisme de référence en matière d'effets du changement climatique à l'échelle du territoire national, dont l'expertise est reconnue et complémentaire de celle du GIEC.

I.1.3 A l'échelle de la montagne : le CNRM, l'ANEM et les projets de recherche locaux

Les territoires de montagne sont considérés comme particulièrement vulnérables au phénomène de changement climatique. Il s'agit de zones où les impacts actuels du réchauffement sont le plus directement observables (recul du front des glaciers, dégradation des pergélisols, diminution du manteau neigeux, migration d'espèces en altitude, etc.). Ils devraient être touchés de manière plus forte par les évolutions climatiques à venir, ce qui confère à l'espace montagnard un rôle d'avant-garde, notamment en termes d'adaptation (ANEM, 2007).

De nombreux travaux de recherche et d'expérimentation portent plus spécifiquement sur cet espace et tentent de fournir des résultats concrets et adaptés à des contextes régionaux, voire locaux.

I.1.3.a Le CNRM

Le Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) est le service de recherche et de développement de Météo-France. Les domaines qu'il couvre sont variés et principalement orientés par les besoins du service public. Les recherches sont menées en étroite collaboration avec des laboratoires extérieurs français et étrangers (CNRS, Centre Européen pour les Prévisions Météorologiques à Moyen Terme, etc.) et sont reconnues au niveau international (le CNRM a par exemple contribué au travail d'expertise du GIEC lors de l'élaboration de son 4^{ème} rapport d'évaluation).

Le CNRM est constitué de 8 Unités de Recherche (UR) parmi lesquelles 2 concernent plus particulièrement la thématique du changement climatique (Source : www.cnrm.meteo.fr) :

- * le Groupe de Météorologie de Grande Echelle et Climat (GMGEC), implanté à Toulouse, a pour mission d'évaluer et de comprendre l'impact des activités humaines

sur le climat et l'environnement atmosphérique, en particulier en Europe et en France. Dans ce cadre, le GMGEC est notamment responsable du développement de la composante « Atmosphère » du modèle communautaire français pour l'étude du climat (ARPEGE-Climat). Il travaille également au développement d'une capacité de prévision à long terme des grandes anomalies saisonnières,

- × le Centre d'Etude de la Neige de Grenoble (CEN) a pour principal domaine d'application la prévision du risque avalanche. Les recherches du CEN sur les propriétés physiques et mécaniques du manteau neigeux, les interactions neige-atmosphère ou encore la météorologie de montagne lui permettent aussi d'étudier et de modéliser la sensibilité de l'enneigement aux évolutions climatiques. Le CEN effectue en outre des recherches sur l'hydrologie de la neige et la fonte nivale. Il entretient notamment une étroite collaboration avec le Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement (LGGE/CNRS-Grenoble).

I.1.3.b L'ANEM

Pour pérenniser les principes régissant ce qui allait devenir la loi montagne de 1985, les élus se sont regroupés au sein de l'Association Nationale des Elus de la Montagne (ANEM) en octobre 1984. Sa principale mission vise à donner aux collectivités des moyens d'action renforcés pour défendre les enjeux économiques, sociaux et environnementaux de la montagne. La loi reconnaît une spécificité montagne, un droit à la différence et la nécessité d'adapter des dispositions générales aux particularités de 25% du territoire français.

L'Association Nationale des Elus de la Montagne regroupe aujourd'hui plus de 4000 communes, 42 conseils généraux, 12 conseils régionaux, 240 parlementaires (députés et sénateurs). Le nombre et la qualité des adhérents lui conférant une légitimité incontestable, l'association est reconnue par le gouvernement comme un interlocuteur qualifié sur toutes les questions relatives à la montagne ou l'aménagement de son territoire. Elle participe ainsi à la définition des politiques nationales.

Lors de sa constitution, elle s'est fixé une triple mission :

- faire connaître la spécificité et l'identité de la montagne et, d'une façon plus générale, défendre la cause de la montagne au sein de la collectivité nationale et de l'Union européenne,
- apporter un appui aux collectivités de montagne dans l'exercice de leurs missions et renforcer structurellement leur capacité d'action,
- offrir un lieu de débat et d'échange sur les grandes problématiques de développement, d'aménagement et de protection de la montagne.

L'Association vise à promouvoir le développement équilibré et durable de chacun des six massifs français (Vosges, Jura, Alpes, Massif central, Pyrénées, Corse) pour que ces territoires puissent pleinement assurer leur triple fonction productive, récréative et environnementale.

I.1.3.c Projets de recherche

CLIMCHALP

Le projet européen ClimChAlp (Climate Change, Impacts and Adaptation Strategies in the Alpine Space)³, s'est déroulé de mars 2006 à mars 2008, dans le cadre du programme Interreg III B (Projet Espace Alpin)⁴. Il avait pour objectif l'analyse des impacts du changement climatique dans l'Espace alpin au travers d'études de cas concrets dans les domaines des risques naturels, de la prévention, du développement territorial et de l'économie.

Il a impliqué les autorités administratives, les chercheurs et les experts de 7 pays alpins⁵. Trois partenaires français se sont engagés dans la démarche : la région Rhône-Alpes, qui a mandaté le Pôle Grenoblois Risques Naturels (PGRN) pour coordonner les actions au niveau français ; l'ONERC, qui est principalement intervenu sur la thématique des risques naturels ; l'Université Claude Bernard de Lyon, qui a été placée à la tête d'un consortium scientifique.

Le projet ClimChAlp constitue une réflexion actualisée et très large sur le changement climatique et ses effets à court, moyen et long terme (I.4). En outre, la dimension appliquée (à travers les études de cas) et transnationale des recherches lui confère une richesse supplémentaire.

ENSEMBLES

Toujours au niveau européen, le projet ENSEMBLES⁶ a été initié par la Commission Européenne en 2004 et s'est achevé en décembre 2009.

Il est perçu comme un projet structurant pour la recherche en rassemblant l'expertise du monde entier. Il s'agit du premier projet visant la mise en place d'un système commun de prévision climatique d'ensemble pour une utilisation dans de larges échelles spatio-temporelles (la saison, la décennie et au-delà ; le global, le régional et le local). Il a permis le

³ En français : Changement climatique, impacts et stratégies d'adaptation dans l'Espace Alpin.

⁴ Le projet Interreg III est l'un des 4 programmes mis en place par la Commission européenne afin de favoriser un développement harmonieux, équilibré et durable du territoire européen sur la période 2000-2006. Le volet B concerne la coopération entre autorités nationales, régionales et locales au sein de 13 grands espaces géographiques prédéterminés. (www.interreg-atlantique.org)

⁵ Allemagne, Autriche, France, Italie, Lichtenstein, Slovénie et Suisse.

⁶ ENSEMBLES-Based Predictions of Climate Changes and their Impacts.

développement de modèles régionaux à très haute résolution sur l'Europe, en remplaçant notamment le modèle français ARPEGE-Climat à résolution variable par le modèle d'aire limitée ALADIN-Climat (entre 10 et 20 km), et la production de scénarios d'évolution du climat permettant d'évaluer les impacts potentiels. Une attention particulière a été portée aux phénomènes extrêmes et aux phénomènes de rétroaction afin d'évaluer et de réduire les incertitudes liées à leur représentation dans les modèles. Des études de cas portant sur les Alpes ont notamment été menées afin d'évaluer les tendances extrêmes en termes d'évolution des températures et des précipitations.

Ce projet s'étant achevé après la réalisation de la présente étude, ses résultats n'ont pu être exploités dans le présent rapport.

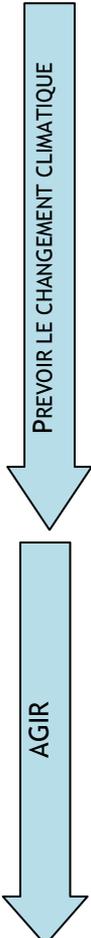
TRAVAUX UNIVERSITAIRES

Parmi les universitaires ayant entrepris des travaux particulièrement intéressants sur la question du changement climatique, citons la thèse de J.C. Loubier (2004) sur l'économie du ski et la biodiversité, préparée au sein de l'Université Joseph Fourier de Grenoble (laboratoire SEIGAD) et de l'Institut de Géographie Alpine.

Les études abondent également dans les autres pays alpins. Les travaux du climatologue Genevois M. Beniston (Institut des Sciences environnementales de l'Université de Genève), qui portent notamment sur la modélisation des évolutions futures dans l'espace montagnard, sont reconnus pour la validité scientifique et l'actualisation de leurs résultats.

I.1.4 Synthèse des acteurs impliqués et des échelles concernées

Le tableau suivant présente de manière synthétique la contribution de chaque acteur aux différentes étapes de la démarche de projection du changement climatique et de ses impacts, les résultats de chaque niveau de réflexion servant de base de travail au niveau suivant.



QUOI ?	QUI ?	A QUELLE ECHELLE ?
Emissions en GES et aérosols ○ modélisation :	GIEC	Monde
Evolutions climatiques ○ modélisation : ○ expertise	CNRM GIEC	France Monde et Europe
Impacts potentiels ○ modélisation : ○ expertise : ○ synthèse :	CNRM GIEC ONERC ANEM	Alpes Monde et Europe France zones de montagne
Stratégies d'adaptation ○ expertise : ○ synthèse :	GIEC ONERC OCDE ANEM	Monde France Alpes zones de montagne
Stratégies d'atténuation ○ expertise :	GIEC OCDE	Monde Monde

Tableau 1 : Synthèse sur les principaux niveaux et acteurs de la réflexion sur le changement climatique

1.2 Principales publications de référence

(voir également Bibliographie p.75)

1.2.1 Sur la prévision de l'évolution climatique et l'exploitation des modèles climatiques

A ce jour, il existe 4 rapports d'évaluation du GIEC, respectivement rendus en 1990, 1995, 2001 et 2007 (1.3). Chaque rapport se fonde sur les évaluations précédentes et intègre les nouvelles connaissances accumulées depuis.

Le GIEC élabore également des rapports spéciaux et des documents techniques sur des sujets spécifiques. Parmi les rapports spéciaux couramment utilisés, le *Special Report on Emission Scenarios (SRES⁷)* (GIEC, 2000), issu du Groupe de travail III, demeure une référence pour l'exploitation des modèles climatiques numériques. Il est admis que la concentration atmosphérique en GES et aérosols a une incidence sur le climat mondial qui peut aller, selon le cas, dans le sens d'un refroidissement ou dans celui d'un réchauffement. La problématique du changement climatique ne peut donc être abordée sans prendre en compte les émissions actuelles et à venir. Le GIEC a fourni un socle de travail commun aux chercheurs du monde entier en réfléchissant à des scénarios d'évolution possible des émissions destinés à servir de contexte de départ pour les simulations d'évolution climatique (I.3.1).

L'ONERC propose des outils d'aide à la décision, notamment destinés aux organismes territoriaux : indicateurs du changement climatique tel qu'il est constaté aujourd'hui et simulateur d'évolution du climat (I.3.3, II.3.2, II.3.3).

I.2.2 Sur les impacts du changement climatique

I.2.2.a Impacts sur le cycle de l'eau

L'ouvrage *Climate Change and Water* est le document technique le plus récent (GIEC, 2008). Fruit du Groupe de travail II, il présente les changements observés et projetés dans toutes les dimensions du cycle de l'eau, avant de s'interroger sur les impacts de ces changements en termes de demande et de capacité de fourniture en eau potable. Le document propose notamment une analyse sectorielle et géographique détaillée et tente de hiérarchiser les priorités. Il poursuit ainsi un double objectif d'amélioration des connaissances et d'information des décideurs et des acteurs de l'eau. La publication récente de cet ouvrage explique son utilisation encore limitée. Toutefois, dans le contexte d'un changement climatique, la question de la disponibilité de la ressource en eau et de sa gestion en fonction de la demande et des divers usages pourrait devenir un enjeu majeur. L'existence d'un rapport ciblé sur cette thématique et publié par une organisation reconnue est donc un atout pour l'avenir.

Comme précisé au I.2.3.e p.22, des études locales à l'échelle des grands bassins versants sont également en cours de réalisation.

⁷ En français : Rapport spécial sur les scénarios d'émissions.

I.2.2.b Impacts sur la neige et ses usages, les ressources en eau et la biodiversité en montagne

Parmi les nombreux travaux publiés par des chercheurs du CNRM, l'étude de P. Etchevers (responsable du CEN) et E. Martin (chercheur au CEN) sur l'impact d'un réchauffement climatique sur l'enneigement, la ressource en eau des bassins versants de montagne et les débits des rivières associées fait actuellement référence (Etchevers P. et Martin E., 2002). Cette étude couple une analyse des conditions météorologiques actuelles en montagne et une simulation numérique des phénomènes futurs. Elle s'intéresse tout d'abord à l'impact d'un changement climatique sur l'enneigement alpin et pyrénéen par le croisement d'un modèle calculant l'évolution du manteau neigeux et d'un modèle fournissant les données météorologiques (II.3.3). L'étude simule dans un second temps l'impact de ce changement sur la ressource en eau dans le bassin du Rhône (Alpes et Jura) par le croisement d'un modèle météorologique et d'un modèle hydrogéologique (II.3.4). Les résultats de ce travail ont été présentés lors du premier colloque international « L'eau en montagne » qui s'est tenu à Megève les 5 et 6 septembre 2002. L'intervention des deux chercheurs a favorisé la diffusion de cette étude, qui est encore largement reprise, par les scientifiques comme par les gestionnaires.

La thèse de J.C. Loubier (2004) concerne les impacts du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité.

Les travaux du climatologue Genevois M. Beniston (Institut des Sciences environnementales de l'Université de Genève), qui portent notamment sur la modélisation des évolutions futures dans l'espace montagnard, sont reconnus pour la validité scientifique et l'actualisation de leurs résultats.

Le consortium transnational du projet ClimChAlp a établi une liste de recommandations à l'intention des décideurs, des administrations et de l'ensemble des acteurs concernés (ClimChAlp, 2008a) afin d'identifier les défis majeurs liés au changement climatique, ainsi que les futurs champs d'action et de recherche.

L'étude de l'ANEM (I.2.3.d p.21 et Annexe 1) présente également les impacts observés en milieu montagnard.

1.2.2.c Impacts sur les risques

Le projet européen ClimChAlp constitue quant à lui la principale source d'informations concernant la question des risques naturels (ClimChAlp, 2008b).

1.2.3 Sur les mesures d'atténuation, les stratégies d'adaptation et les impacts socio-économiques

Les résultats de travaux disponibles concernent surtout l'atténuation du phénomène, par des actions de diminution des émissions en Gaz à Effet de Serre. La question de l'adaptation fait depuis récemment l'objet de plusieurs projets de recherche menés à des échelles diverses. Les incertitudes liées au phénomène même de changement climatique rendent difficiles la définition et la mise en œuvre concrète de mesures. Ceci explique qu'il existe actuellement peu d'initiatives engagées sur l'adaptation au changement climatique.

1.2.3.a ONERC

Afin d'assurer sa double mission d'information et d'expertise, l'ONERC développe un certain nombre d'outils. Il assure d'une part l'alimentation d'une banque de données sur les impacts du changement climatique sur le territoire national. Il constitue en parallèle une riche bibliographie par la réalisation de rapports de synthèse et de notes techniques. Il pilote un groupe de travail interministériel sur l'évaluation des impacts du changement climatique, du coût des dommages et des mesures d'adaptation en France, dont le premier document d'étape a été publié en juin 2008 (ONERC, 2008) (1.4). Le rapport final a été publié en novembre 2009 et s'intitule « Changement climatique - Coût des impacts et pistes d'adaptations ». Il propose une méthode d'évaluation des impacts et des coûts et dresse un état de la connaissance sur 7 thématiques essentielles (Source : www.ecologie.gouv.fr) : la santé ; l'énergie ; l'urbanisme et les infrastructures de transport ; le tourisme ; les risques naturels et les assurances ; l'agriculture, la forêt et la ressource en eau ; les territoires. En ce qui concerne la ressource en eau, quelques pistes générales d'adaptation sont préconisées mais le rapport indique comme message clé que « *Pour préparer l'adaptation, il est nécessaire d'améliorer la connaissance des impacts et des milieux, la modélisation des systèmes en interaction avec l'eau, organiser une surveillance des eaux (surface, souterraine) et des milieux (zones humides, littorales).* »

Le Plan climat 2004 a également confié à l'ONERC la réalisation d'une stratégie nationale pour l'adaptation au changement climatique (ONERC, 2007). Publiée en parallèle de la parution d'un Live vert sur le même sujet par la Commission Européenne, elle définit 9 axes stratégiques généraux ainsi que des pistes d'action par thématiques, par milieux et par secteurs, parmi lesquels :

- * Développer la connaissance,
- * Consolider le dispositif d'observation,
- * Promouvoir une approche adaptée aux territoires.

Cette stratégie ainsi que le rapport de l'ONERC de novembre 2009 doivent servir de support de réflexion à l'élaboration d'un Plan national d'adaptation pour 2011. Il aura vocation à définir des mesures dans des sujets divers tels que la lutte contre les inondations et l'adaptation des zones littorales, l'évolution des forêts, la question de l'eau et l'adaptation de l'économie.

1.2.3.b MEEDDM

Dans le cadre de l'élaboration du Plan d'adaptation national, et sur la thématique de l'eau plus particulièrement, le projet « Explore 2070 » a été lancé par le MEEDDM courant 2010 afin d'élaborer et d'évaluer, à partir de différents scénarios climatiques, des stratégies d'adaptation en France face à l'évolution des hydrosystèmes (de surface et souterrains) et des milieux côtiers à l'horizon 2050-2070. Les stratégies devraient prendre la forme de feuilles de route opérationnelles. Ce projet s'intègre dans l'un des axes de la Stratégie nationale d'adaptation, en permettant le développement de la connaissance sur les impacts et leur quantification pour construire des stratégies d'adaptation efficaces et évaluer les besoins. Le projet devrait s'achever en 2012.

1.2.3.c OCDE

Parmi les publications les plus récentes concernant le changement climatique global le rapport intitulé *The Economics of Climate Change Mitigation* présente les résultats d'une étude portant sur différents scénarios, globaux mais aussi nationaux, régionaux et sectoriels, d'atténuation du changement climatique et leurs implications économiques (OCDE, 2009). Le même type d'analyse avait déjà été mené en 2008 sur la question de l'adaptation aux effets du changement climatique. Le rapport de cette étude fournit, à l'instar du travail réalisé par l'ONERC à l'échelle nationale, une évaluation critique des coûts et bénéfices des stratégies d'adaptation, de leurs limites et de la pertinence d'éventuelles mesures incitatives (OCDE, 2008). Pour finir, un document d'orientation a été publié en août 2009 afin de fournir

des informations et des conseils sur la prise en compte de l'adaptation au changement climatique dans la coopération internationale en faveur du développement.

Consciente que les Alpes sont particulièrement sensibles au phénomène de changement climatique, l'OCDE s'est intéressée à la question de l'adaptation dans le contexte alpin, où « la capacité d'adaptation est élevée » (OCDE, 2007). Elle a ainsi publié en mars 2007 un rapport d'évaluation sur les impacts actuels et potentiels du changement climatique dans deux secteurs majeurs du développement territorial alpin : le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. L'étude porte aussi sur les mesures d'adaptation déjà mises en œuvre et propose des pistes de réflexion pour l'avenir, notamment sur le rôle des pouvoirs publics. Il s'agit de mettre en évidence des exemples de bonnes pratiques ainsi que les contraintes et limites éventuellement rencontrées.

I.2.3.d ANEM

L'étude de l'OCDE sur les impacts du changement climatique dans l'espace alpin s'est faite en parallèle d'une réflexion de l'Association Nationale des Elus de Montagne (ANEM) sur le même sujet. L'association est reconnue par le gouvernement comme un interlocuteur qualifié sur les questions relatives à la montagne. C'est pourquoi elle a souhaité prendre part aux travaux menés sur le changement climatique en montagne. L'objectif de cette étude est « d'intégrer la voix et le point de vue des montagnards » à un débat qui se réfère souvent aux conclusions d'experts extérieurs (ANEM, 2007).

L'étude s'est faite en 3 temps : recherches bibliographiques, entretiens avec les acteurs du domaine et analyse de contributions écrites essentiellement fournies par des organismes de recherche nationaux, régionaux et locaux. Le rapport de cette étude a été présenté en octobre 2007, lors du 23^{ème} congrès annuel de l'ANEM consacré au changement climatique. Intitulé *Au-delà du changement climatique : les défis de l'avenir de la montagne* (ANEM, 2007), il constitue une synthèse pertinente sur le sujet et adopte une démarche prospective. Après avoir présenté les impacts déjà observés dans l'espace montagnard, le rapport s'intéresse aux impacts potentiels et met en évidence la nécessité de réagir dès à présent (I.4). Une liste de recommandations appliquées au contexte montagnard s'esquisse au fur et à mesure de l'analyse, qui concerne l'ensemble des enjeux majeurs des territoires de montagne (Annexe 1) : agriculture, pastoralisme, foresterie, ressource en eau, risques naturels et tourisme (pour ces deux derniers secteurs, le rapport reprend en grande partie les conclusions de l'OCDE, de l'étude de P. Etchevers et E. Martin (2002), et du projet ClimChAlp). Afin de fournir des éléments de réflexion directement exploitables, le rapport présente, pour chaque recommandation, les conditions de succès et les difficultés éventuellement rencontrées (économiques, réglementaires, etc.). L'étude de l'ANEM a été volontairement conduite en parallèle des réflexions menées dans le cadre du Grenelle de l'Environnement, pour que les

propositions présentées au 23^{ème} congrès puissent être prises en compte dans le projet de Grenelle.

1.2.3.e Etudes locales

Des études sont menées à des échelles plus locales, sur de grands bassins versants comme celui de la Loire, de l'estuaire de la Gironde et de la Meuse, afin d'étudier les conséquences du changement climatique sur les régimes d'écoulement et définir des mesures d'adaptation pertinentes.

1.3 Hypothèses d'évolution du système climatique

1.3.1 Scénarios d'émissions

A ce jour, l'approche par simulation numérique semble être la voie la plus efficace pour tenter de comprendre et de mesurer le changement climatique (Loubier J.C., 2004). La modélisation de la mécanique du climat implique de définir un contexte de départ servant au calibrage du modèle et qui constitue une hypothèse de l'état du système au temps T_0 de la simulation. Le système climatique est essentiellement caractérisé par son bilan énergétique⁸, qui dépend étroitement de la concentration atmosphérique en Gaz à Effet de Serre (GES) et en aérosols, concentration elle-même influencée par divers facteurs naturels et humains (ou « agents de forçage »). Déterminer l'état du système climatique et son évolution passe donc par l'identification et la quantification des agents de forçage et de leur évolution.

1.3.1.a Présentation des scénarios d'émissions du GIEC

Le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émissions (GIEC, 2000), ou *Special Report on Emission Scenarios* (SRES), présente un certain nombre d'hypothèses d'évolution des agents de forçage au cours du XXI^{ème} siècle. Les principaux agents identifiés sont déterminés en fonction d'une évolution naturelle et anthropique de la planète liée à l'évolution démographique, au développement économique et social, aux orientations politiques et aux évolutions technologiques et environnementales. Chaque scénario décrit les caractéristiques, les dynamiques et les interrelations de ces paramètres plus ou moins quantifiables, qui ont des conséquences au niveau énergétique et dans l'occupation des sols et détermineront donc les émissions futures.

⁸ Bilan entre l'énergie qui entre dans l'atmosphère terrestre et l'énergie qui en sort.

Les scénarios d'émissions sont regroupés au sein de 4 familles, selon qu'ils sont plutôt tournés vers de fortes valeurs économiques ou environnementales, et vers une globalisation ou une régionalisation croissantes. La Figure 1 illustre les tendances respectives de chaque famille de scénarios.

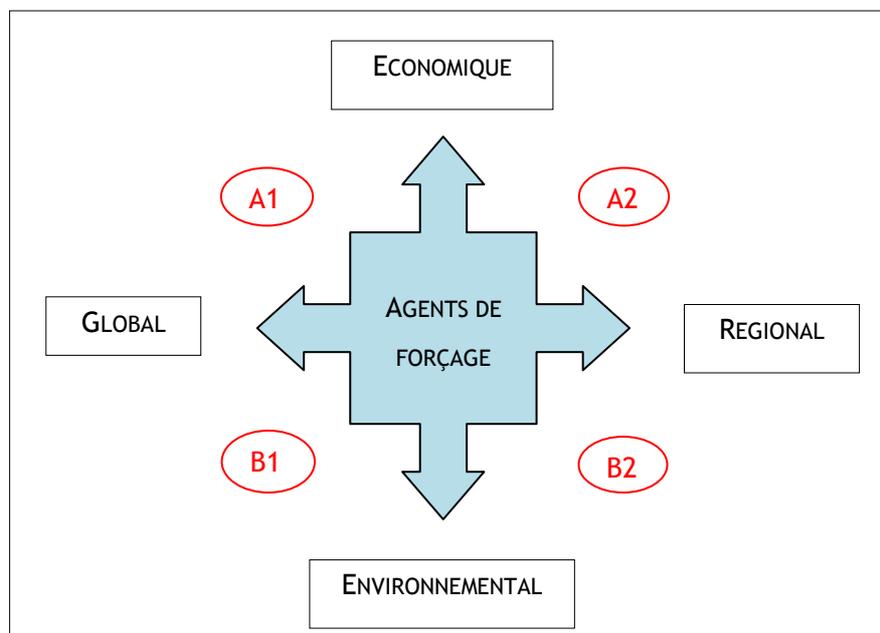


Figure 1 : Représentation schématique des 4 familles de scénarios d'émissions du SRES

Conformément à ces tendances, les principales caractéristiques de chaque famille sont les suivantes (Loubier J.C., 2004 et GIEC, 2007b) :

- ✘ Famille A1 : elle décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, avec de nouvelles technologies de plus en plus puissantes introduites rapidement. La population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle avant de décliner par la suite. Cette famille a été subdivisée en 3 groupes, qui sont marqués par les mêmes caractéristiques économiques et démographiques, mais des moyens d'acquisition de l'énergie qui diffèrent : groupe A1FI = forte intensité de combustibles fossiles ; groupe A1T = sources d'énergie autres que fossiles ; groupe A1B = équilibre entre les sources qui permet une décroissance des émissions de GES à partir de 2050 (groupe le plus représentatif des conditions actuelles),
- ✘ Famille A2 : elle décrit un monde hétérogène reposant sur une autosuffisance régionale et la préservation des identités locales. Ce régionalisme fragmente et donc ralentit l'évolution technologique et la croissance économique. Néanmoins, le recours à l'énergie n'est brimé par aucune contrainte forte et les émissions de GES sont donc très importantes et continues jusqu'en 2100. On constate par ailleurs un accroissement continu de la population mondiale,
- ✘ Famille B1 : l'approche est ici semblable à celle de la famille A1 concernant la population. En revanche, des changements rapides dans les structures économiques

interviennent en faveur des services et de l'information. L'introduction de technologies propres et la gestion efficace des ressources énergétiques permettent une stabilisation assez rapide des émissions. On s'oriente donc vers une viabilité économique, sociale et environnementale à l'échelle mondiale,

- ✘ Famille B2 : elle reprend les idées des familles A2 et B1 avec un accent mis sur des solutions locales dans un monde où la population s'accroît de façon continue mais relativement lente. On note une forte orientation vers la protection de l'environnement et l'équité sociale. On assiste en outre à un développement économique intermédiaire et une évolution technologique modérée. Il s'agit d'une famille de scénarios correspondant à des émissions relativement faibles de GES.

I.3.1.b Projections d'émissions et de concentrations atmosphériques en CO₂ associées

A partir de ces projections démographiques, économiques, sociales et environnementales, les scénarios d'émissions sont quantifiés à l'aide de modèles d'impacts intégrés. La Figure 2 présente les résultats de ces modélisations concernant les émissions globales annuelles de dioxyde de carbone de 1990 à 2100. Elle met en évidence les différents niveaux d'émissions simulés selon la famille de scénarios considérée. On constate que les émissions les plus importantes de CO₂ seraient réalisées dans le cas d'un scénario A1FI (importante consommation de combustibles fossiles) ou A2 (recours à l'énergie non contraint). Les émissions les plus faibles seraient quant à elles associées à un scénario A1T (utilisation de sources d'énergie renouvelables) ou B1 (introduction de technologies propres et gestion efficace des ressources énergétiques).

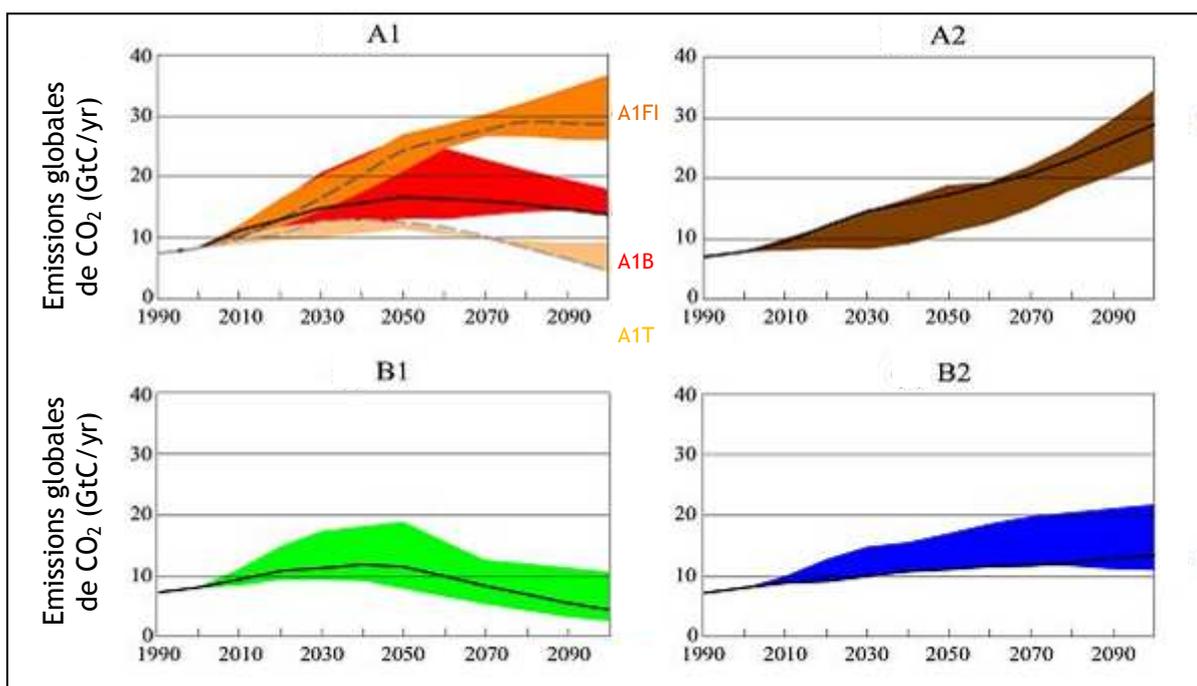


Figure 2 : Simulation d'évolution des émissions globales annuelles de CO₂ de 1990 à 2100 pour les différentes familles de scénarios d'émissions du SRES, en gigatonnes de carbone par an (GtC/yr)

(Source : GIEC, 2000)

Les bandes de couleurs représentent l'amplitude des simulations pour l'ensemble des scénarios au sein de chaque famille. Un scénario représentatif de chacune des 6 familles a été déterminé et est symbolisé par une ligne continue ou en tirets.

Les concentrations atmosphériques exprimées en équivalent CO₂ associées aux émissions de la Figure 2 sont approximativement, en 2100, de (GIEC, 2007a) :

- * 600 ppm (parties par million) (soit 1278 GtC⁹) pour le scénario le plus représentatif de la famille B1,
- * 700 ppm (1491 GtC) pour celui de la famille A1T,
- * 800 ppm (1704 GtC) pour celui de la famille B2,
- * 850 ppm (1810,5 GtC) pour celui de la famille A1B,
- * 1250 ppm (2662,5 GtC) pour celui de la famille A2,
- * 1550 ppm (3301,5 GtC) pour celui de la famille A1FI.

Pour comparaison, la concentration était d'environ 280 ppm (596,4 GtC) au milieu du XIX^{ème} siècle. Ce sont ces concentrations qui sont ensuite intégrées aux modèles climatiques afin de prendre en compte l'évolution des émissions dans la modélisation du climat futur.

⁹ 1 ppm en équivalent CO₂ = 2.13 GtC (<http://cdiac.ornl.gov>).

Chaque scénario du SRES possède une probabilité de réalisation égale à celle des autres. Il ne s'agit pas de prévision à proprement parlé, mais chaque scénario permet d'envisager une évolution possible de la planète et donc un exemple de conditions climatiques futures. En outre, les scénarios du SRES ne prennent pas en compte d'éventuelles initiatives en matière de climat. Aucun scénario n'inclut par exemple la réalisation des objectifs du protocole de Kyoto.

I.3.1.c Autres scénarios d'émissions

Les scénarios du SRES sont aujourd'hui la référence en matière d'hypothèses d'émissions. Ils sont à la base de la plupart des modélisations, qu'elles soient effectuées à l'échelle mondiale, continentale ou régionale. Ils n'ont néanmoins pas l'exclusivité. Des scénarios plus théoriques peuvent être utilisés. Il s'agit par exemple d'une croissance des GES semblable à celle observée durant le XX^{ème} siècle, ou encore d'une croissance de 1%/an à partir des niveaux préindustriels jusqu'à doublement de la concentration, qui ont aussi été utilisées par le GIEC lors de l'élaboration de son 4^{ème} rapport d'évaluation (GIEC, 2007b). Ces scénarios ont peu de probabilité de se réaliser mais permettent d'effectuer des comparaisons à partir d'hypothèses plus simples.

I.3.2 Modélisations climatiques

I.3.2.a A l'échelle mondiale

Les modélisations globales sont réalisées par des Modèles Généraux du Climat (MGC). Ce sont des modules numériques chargés de traiter les différents processus en action dans le système climatique : échange d'énergie entre les compartiments, circulation générale de l'air, transports d'eau associés, cycle du carbone, etc.

Les premiers modèles climatiques n'intégraient que les processus atmosphériques. Aujourd'hui, les modèles prennent le plus souvent en compte les interactions entre l'atmosphère, les océans, les terres émergées et les masses glaciaires polaires. Ils sont alors dits « couplés » (Source : <http://www.ec.gc.ca>). Dans la pratique, le modèle divise l'atmosphère, la terre et les océans en une grille tridimensionnelle constituée de mailles interactives. La simulation se traduit par le calcul d'une valeur (température, précipitation, courants maritimes et atmosphériques, etc.) aux 4 nœuds de chaque maille. Plus la largeur de la maille, ou résolution horizontale, est petite, plus la précision du modèle est importante (Loubier J.C., 2004). Les concentrations atmosphériques en GES et aérosols, de même que l'occupation du sol, la nébulosité, le taux d'humidité (etc.) servent à définir les conditions initiales de chaque maille.

Les deux modèles climatiques français sont développés, l'un par Météo-France (CNRM) et le CERFACS (Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique), l'autre par l'IPSL (Institut Pierre Simon Laplace). Il s'agit de modèles généraux couplés (AOGCMs ou Atmospheric-Ocean General Circulation Models) qui intègrent chacun 4 composantes :

- * Une composante atmosphérique simulant la température, la pression atmosphérique, la densité de l'air ou encore le cycle hydrologique,
- * Une composante océanique simulant la circulation océanique et les propriétés de l'eau,
- * Une composante intégrant des processus de surface, qui prend notamment en compte la végétation, l'humidité du sol, la température de surface et l'évaporation,
- * Une composante glace de mer.

Les deux modèles diffèrent principalement par la paramétrisation de leur composante atmosphérique. L'un de leurs points communs est qu'il s'agit de modèles « à maille variable » pour leur composante atmosphérique, ce qui signifie qu'ils peuvent offrir une résolution horizontale différente selon la zone d'étude. Cela permet d'effectuer une simulation plus rapide et plus précise sur une zone d'intérêt particulier par rapport à la simulation effectuée aux antipodes de cette zone. La résolution de la composante atmosphérique du modèle CNRM-cm3, ARPEGE-Climat version 3, est ainsi de 50 à 60 km sur l'Europe du Sud et la Méditerranée contre 450 à 500 km dans le Pacifique et l'Atlantique Sud. La composante atmosphérique LMDZ du modèle IPSL-cm4 a quant à elle une résolution de 160 km sur la France. Nous avons néanmoins choisi de présenter les modèles couplés français dans la partie traitant des simulations à l'échelle mondiale car la variabilité de la résolution ne concerne pas l'ensemble de leurs composantes. Ainsi, au final, les modèles couplés en eux-mêmes possèdent une résolution horizontale faible à moyenne allant de 200 à 1000 km. Nous verrons toutefois que les modèles atmosphériques ARPEGE-Climat et LMDZ, grâce à leur capacité de zoom, peuvent aussi être utilisés dans le cadre d'études régionales.

Un certain nombre de facteurs limitent la portée des résultats des modélisations globales. Le système climatique est tout d'abord déterminé par de complexes interactions spatio-temporelles qui le rendent, par définition, en partie imprévisible. On ne peut aller au-delà du champ des estimations. Cette grande variabilité du système climatique se traduit notamment par l'existence de phénomènes de rétroaction liés à la vapeur d'eau, aux modifications de

l'albédo de surface et aux nuages, dont la quantification doit être améliorée¹⁰ (Livre Blanc ESCRIME, 2006).

L'estimation de l'influence de nombreuses caractéristiques de surface (végétation, orographie, etc.) est également délicate, du fait de la faible résolution des MGC. Elle est pourtant essentielle afin de prévoir les caractéristiques régionales des changements à venir.

Des inconnues sont aussi liées aux différents scénarios d'émissions, eux-mêmes issus de simulations, et qui varient sous l'influence des activités anthropiques. Il faut considérer la multiplicité et la variété des agents de forçage à appliquer aux modèles. Des forçages qui ne sont pas pris en compte de la même façon par tous les modèles.

Enfin, malgré l'amélioration des résolutions et des couplages et les progrès réalisés dans l'analyse des fourchettes d'incertitude, qui permettent aux modèles globaux de fournir des estimations quantitatives pertinentes et utiles, une certaine simplification du réel est nécessaire pour permettre sa modélisation (Loubier J.C., 2004).

1.3.2.b A une échelle plus fine d'analyse

L'affinement des résultats doit permettre une réponse plus efficace et rapide face aux changements à venir. En outre, la question des phénomènes extrêmes (vagues de chaleur, tempêtes, inondations, etc.), qui semble étroitement liée à celle du changement climatique et qui se pose à des échelles plutôt locales, renforce ce besoin de régionalisation des tendances.

Deux approches complémentaires sont principalement adoptées pour effectuer ce changement d'échelle : une approche dynamique utilisant des modèles climatiques à résolution spatiale fine et une approche empirique fondée sur l'application de méthodes statistiques. Les deux méthodes reposent sur l'hypothèse qu'il existe des relations significatives entre les climats locaux et globaux et prennent donc pour point de départ les résultats des AOGCM. En termes d'échelle d'analyse, les résultats peuvent aller des grands domaines continentaux (c'est par exemple l'échelle choisie par le GIEC dans son 4^{ème} rapport d'évaluation) aux pays et aux régions (les travaux de l'ONERC sont ici représentatifs pour ce qui est de la France).

L'approche dynamique utilise des Modèles Climatiques Régionaux (RCMs ou Regional Climate Models) de haute résolution horizontale : de 100 à 50 km, voire une dizaine de km¹¹. La démarche générale consiste à « piloter » un RCM par le modèle global. On parle donc

¹⁰ On estime par exemple que la prise en compte totale de la rétroaction liée aux nuages, qui est aujourd'hui la moins bien connue, pourrait engendrer des écarts de 1 à 2 °C sur la température moyenne à l'échéance d'un siècle.

¹¹ Le modèle ALADIN-Climat, couplé à ARPEGE, réalise par exemple de manière opérationnelle des adaptations dynamiques à une échelle de 10 km.

également de modèles « emboîtés ». Les données sur les conditions initiales proviennent du modèle global, qui simule la réponse de la circulation générale aux forçages à large échelle. Le RCM intègre quant à lui les données d'observation effectuées sur les agents de forçage de sous-échelle tels que la topographie ou la végétation, ce qui améliore les simulations des variables atmosphériques et climatiques sur la zone considérée (Source : www.cccsn.ca). La résolution temporelle des données fournies est également plus fine, ce qui permet une meilleure représentation de certains phénomènes météorologiques extrêmes qu'avec les AOGCMs. Néanmoins, les données issues des modèles régionaux dépendent étroitement de celles du modèle pilote. Les biais du modèle global peuvent donc être exacerbés dans le RCM. En outre, il s'agit de simulations coûteuses en termes de temps de calcul, c'est pourquoi peu de scénarios d'ensemble sont disponibles (Source : www.cccsn.ca).

Les techniques de réduction d'échelle statistique consistent à calculer, à partir de données d'observation, les relations statistiques existant entre les variables globales et les variables régionales ou locales. Ces relations sont ensuite appliquées aux résultats des modèles généraux afin d'obtenir une série de données plus précises. Cela implique de partir de l'hypothèse que ces relations demeureront valides dans les conditions climatiques futures (Source : www.cccsn.ca). Il s'agit de techniques beaucoup moins contraignantes sur le plan du temps de calcul informatique et donc moins coûteuses que l'approche dynamique, qui fournissent en outre des simulations à une échelle encore plus fine d'analyse. Mais la performance d'un modèle statistique dépend étroitement de la localisation de l'étude et de la disponibilité des données car elle nécessite un volume important de données d'observation sur une période assez longue pour établir des relations statistiques efficaces. Il est donc probable que la réduction statistique d'échelle spatiale donne de moins bons résultats dans des régions où l'acquisition de données est plus difficile, comme par exemple les régions de montagneuse, en particulier pour certaines variables comme les précipitations. D'autre part, il peut s'avérer impossible de déterminer des relations significatives pour certains paramètres. Enfin, notons que les méthodes statistiques ne permettent pas la prise en compte des phénomènes de rétroaction régionale (Source : www.cccsn.ca).

Une alternative à ces deux types d'approche est l'utilisation de modèles climatiques à résolution variable. C'est la méthode qui a été privilégiée par le CNRM et l'IPSL. Elle permet une résolution fine sur certaines parties du globe tout en conservant la capacité de modélisation de la planète entière. En outre, elle présente l'avantage d'affranchir le processus de changement d'échelle de la tutelle d'un modèle global présentant déjà des biais propres.

Chaque méthode présentant un certains nombres d'avantages et d'inconvénients, il peut être intéressant d'étudier différentes techniques de régionalisation afin de trouver celle qui sera la plus adaptée au terrain sur lequel on souhaite obtenir des projections climatiques.

1.3.3 Résultats des simulations d'évolution du système climatique

La modification du système climatique est déjà visible à travers l'évolution de certains paramètres climatiques tels que la température. Le changement climatique se manifeste aussi par la modification de paramètres non climatiques mais largement influencés par le climat comme le niveau de la mer. L'observation des changements actuels permet d'identifier ces variables sensibles qui nécessitent un suivi. De là, il s'agit de simuler leur évolution en fonction de différents scénarios possibles d'évolution du climat.

1.3.3.a A l'échelle du monde

Le 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC constitue la synthèse la plus récente des simulations climatiques réalisées par la communauté scientifique mondiale (GIEC, 2007b). Cette synthèse est effectuée à deux échelles d'analyse : l'échelle mondiale et l'échelle continentale. La comparaison des simulations effectuées pour le XX^{ème} siècle avec les données d'observation permet de leur accorder une large confiance¹². En outre, malgré des différences significatives de fonctionnement entre certains modèles globaux, leurs résultats convergent au niveau qualitatif puisque les tendances simulées sont globalement cohérentes (Loubier J.C., 2004).

TEMPERATURE

A l'échelle mondiale, les simulations projettent ainsi une augmentation de la température de l'air en surface d'ici à la fin du XXI^{ème} siècle (2090-2099) entre 1,8°C (meilleure estimation dans le cas du scénario SRES le plus bas B1) et 4°C (meilleure estimation dans le cas du scénario SRES le plus haut A1FI), par rapport à la fin du XX^{ème} siècle (1980-1999)¹³. Pour comparaison, l'augmentation est estimée à 0,6°C dans le cas d'un maintien des concentrations aux niveaux de l'an 2000¹⁴. Les tendances actuellement observées suggèrent que les estimations de + 2°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle sont très optimistes et que cette augmentation interviendrait plutôt vers 2050, tandis que l'on se situerait plus vers une augmentation de 4 à 5°C en 2100. Il s'agit ici de températures moyennes mondiales dont l'évolution est détaillée dans la Figure 3.

¹² Par exemple, depuis le premier rapport d'évaluation du GIEC (1990) les projections indiquent des accroissements de température moyenne mondiale de 0,15 à 0,3°C par décennie entre 1990 et 2005. Les valeurs observées révèlent une augmentation réelle d'environ 0,2°C par décennie.

¹³ On peut rajouter environ 0,5°C pour obtenir le réchauffement par rapport à la période préindustrielle.

¹⁴ Même si les concentrations restaient constantes, le réchauffement se poursuivrait, principalement en raison de la réponse thermique lente des océans et de l'existence d'une évolution naturelle du système climatique.

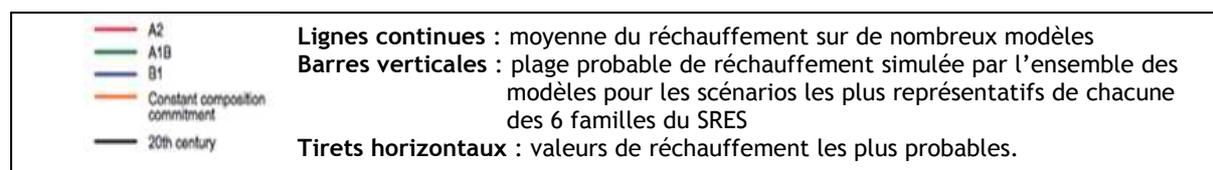
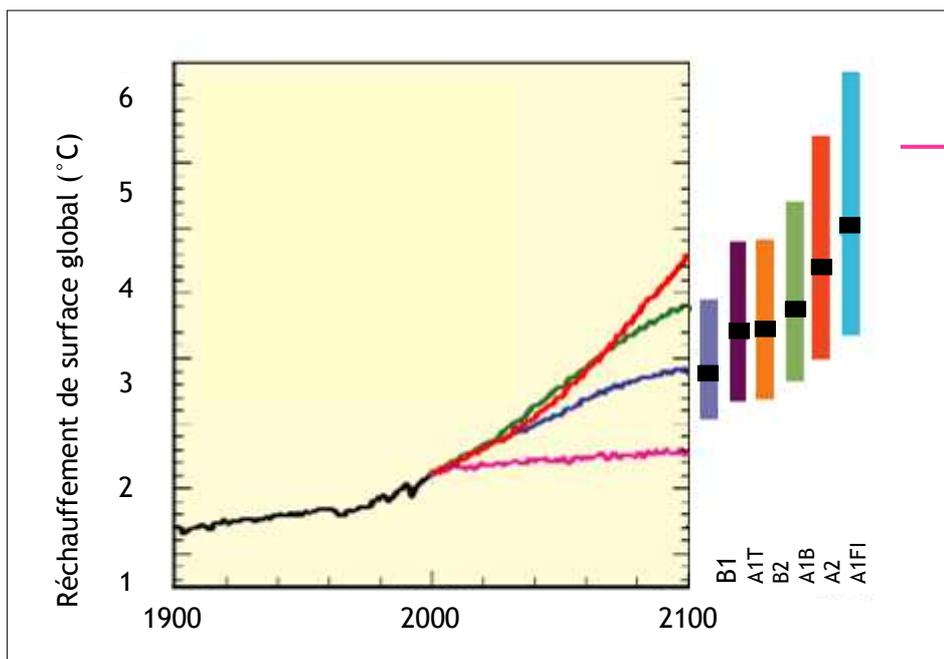


Figure 3 : Simulation d'évolution des températures globales de surface au cours du XXI^{ème} siècle pour chaque famille de scénarios d'émissions du SRES

(Source : GIEC, 2007a)

Cette figure rappelle les 6 scénarios SRES de référence et présente les projections des températures de surface associées, par rapport à la moyenne de la période 1980-1999. Elle permet de comparer les estimations de réchauffement selon le scénario d'émissions choisi et d'évaluer la fourchette d'incertitude propre à chaque scénario. On constate l'importante variabilité quantitative des estimations entre les différents scénarios et donc l'influence de la concentration atmosphérique en GES dans l'évolution de la température mondiale de surface.

NIVEAU DE LA MER

Le second paramètre déterminant à l'échelle globale est celui du niveau de la mer, puisque les océans occupent 70 % de la surface du globe et que les zones côtières abritent plus de 60 % de la population mondiale (Source : www.cidce.org) et beaucoup d'activités économiques. Le Tableau 2 présente les résultats synthétisés par le GIEC et met en parallèle la montée du niveau de la mer avec l'augmentation de la température.

Cas	Augmentation de la température de surface globale (en °C)		Montée du niveau de la mer (en m)
	Valeur la plus probable	Plage de vraisemblance	Plage de vraisemblance
Concentration atmosphérique en CO ₂ constante après 2000	0,6	0,3 - 0,9	Non disponible
Scénario B1	1,8	1,1 - 2,9	0,18 - 0,38
Scénario A1T	2,4	1,4 - 3,8	0,20 - 0,45
Scénario B2	2,4	1,4 - 3,8	0,20 - 0,43
Scénario A1B	2,8	1,7 - 4,4	0,21 - 0,48
Scénario A2	3,4	2,0 - 5,4	0,23 - 0,51
Scénario A1FI	4,0	2,4 - 6,4	0,26 - 0,59

Tableau 2 : Estimation de l'évolution des températures de surface et du niveau de la mer d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, selon les 6 scénarios de référence du SRES et un scénario simple d'émissions

Les valeurs exprimées sont les moyennes simulées pour la décennie 2090-2099, par rapport à la moyenne de la décennie 1980-1999.

Les modèles utilisés jusqu'à présent n'incluent pas les incertitudes liées aux rétroactions dans le cycle du carbone, ni tous les effets des modifications dans l'écoulement des calottes de glace, la compréhension de ces phénomènes et de leurs effets étant encore insuffisante. En outre, la contribution liée à l'augmentation de l'écoulement de la glace du Groenland et de l'Antarctique n'est prise en compte qu'à travers l'insertion dans les modèles des taux observés sur 1993-2003, mais ces vitesses d'écoulement pourraient augmenter à l'avenir. Des valeurs plus élevées ne sont donc pas à exclure.

I.3.3.b A l'échelle de l'Europe

Le GIEC a ensuite effectué une régionalisation de ces résultats par continent afin d'affiner l'analyse et d'intégrer d'autres paramètres, dont les caractéristiques régionales sont trop importantes pour être estimées de manière significative et pertinente à l'échelle du globe. Il s'agit notamment du régime des précipitations et des phénomènes climatiques extrêmes. Le GIEC s'est en outre concentré sur 3 scénarios contrastés du SRES (A1B, A2 et B1). Pour sa régionalisation des simulations à l'échelle du continent européen, le GIEC s'est très largement appuyé sur les résultats du projet PRUDENCE¹⁵, qui a été mis en œuvre dans le cadre du programme Energie, Environnement et Développement Durable de l'Union Européenne de 2001 à 2004.

¹⁵ Prediction of Regional scenarios and Uncertainties for Defining European Climate change risks and Effects.

TEMPERATURE

Concernant la température moyenne annuelle de l'air, l'Europe devrait connaître une augmentation plus importante que l'augmentation globale, comme le montre la Figure 4. On constate que les simulations régionales suggèrent un réchauffement situé entre 1,8°C et 4,2°C pour le scénario B1 à la fin du XXI^{ème} siècle, alors qu'il se situe entre 1,1°C et 2,9°C à l'échelle du globe (Tableau 2).

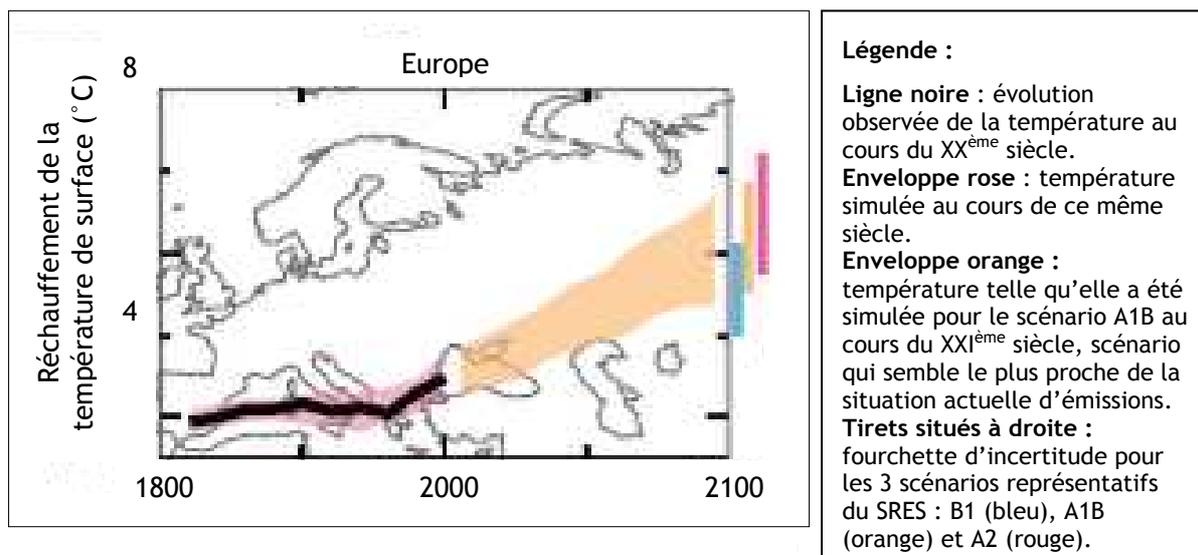


Figure 4 : Simulation d'évolution de la température de surface en Europe au cours des XX^{ème} et XXI^{ème} siècles pour 3 scénarios du SRES

(Source : GIEC, 2007c)

Au niveau saisonnier, le réchauffement le plus important devrait se situer en Europe du nord en hiver et dans la zone méditerranéenne et l'Europe centrale en été (Figure 5). Quant aux événements extrêmes, la fréquence, l'intensité et la durée des vagues de chaleur devraient croître, à l'inverse du nombre de jours de gelées.

PRECIPITATIONS

Concernant les précipitations annuelles, les simulations prévoient leur augmentation en Europe du nord (de 0 à + 16 %) et leur diminution en Europe centrale et dans la zone méditerranéenne (de - 4 à - 27 %) (Figure 5). Au niveau saisonnier, l'Europe centrale devrait voir ses précipitations augmenter en hiver et diminuer en été, et ainsi connaître un risque accru de sécheresse estivale, de même que la zone méditerranéenne (Figure 5). Risque qui devrait être accentué par l'augmentation de l'évaporation printanière et estivale et donc la diminution de l'humidité des sols. En revanche, le risque de fortes pluies devrait toucher de manière plus intense et plus fréquente les zones où les précipitations moyennes augmenteront. La Figure 5 illustre le propos tout en mettant en parallèle l'évolution du régime des précipitations avec celle de la température. Néanmoins, les changements dans les

précipitations (moyennes et extrêmes) varient de manière significative à de petites échelles spatiales, surtout dans les zones de topographie complexe. Il convient donc de rester prudent dans l'utilisation de ces estimations régionales, notamment lorsque l'on souhaite les appliquer à un contexte local d'étude.

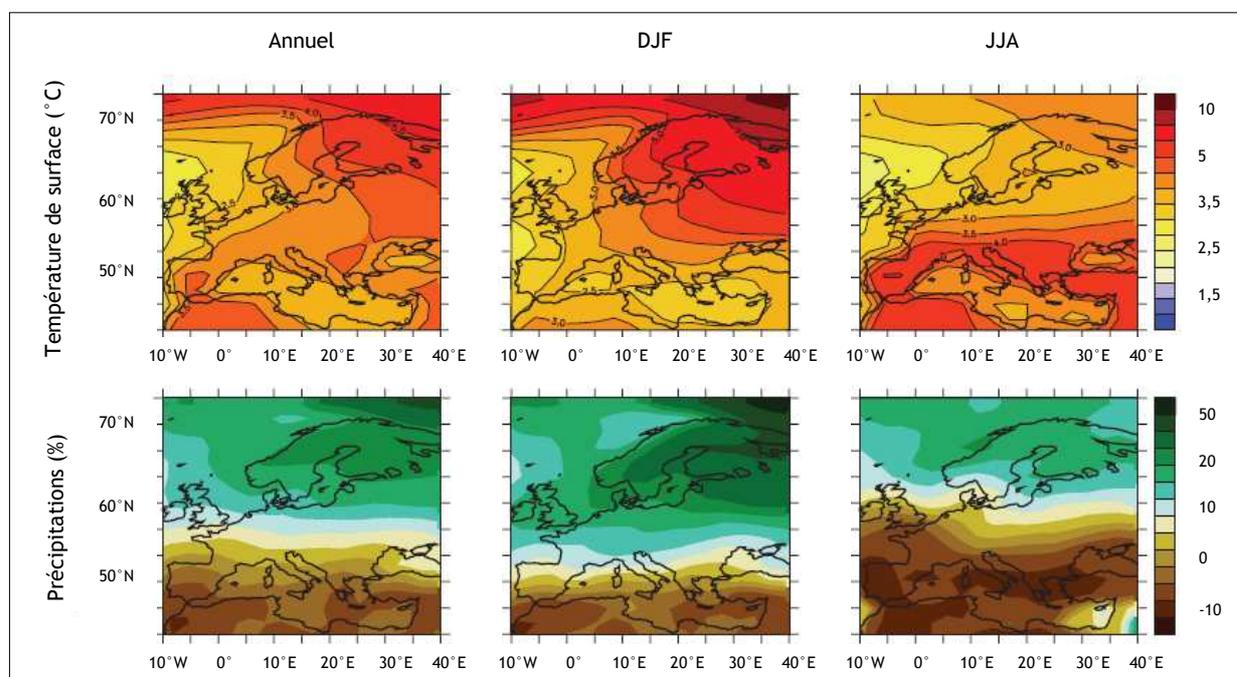


Figure 5 : Simulation d'évolution de la température (en haut) et des précipitations (en bas) en Europe sur la période 2080-2099 par rapport à la période 1980-1999, pour le scénario d'émissions A1B, en moyenne annuelle, hivernale (DJF) et estivale (JJA)

(Source : GIEC, 2007c)

Cette synthèse du GIEC constitue une base de travail solide et actualisée tenant compte de la variabilité spatiale et temporelle des résultats des simulations. Les cartes du chapitre consacré à la régionalisation, centrées sur l'Europe, permettent de situer la France dans le contexte des changements globaux. Mais le rapport fait également état d'incertitudes et précise les points qui nécessitent une étude spatiale plus fine.

1.3.3.c A l'échelle de la France et des Alpes Françaises

Les simulations réalisées à une échelle fine d'analyse doivent permettre des applications plus locales de leurs résultats, notamment en termes d'impacts du changement climatique sur les territoires. Dans le contexte de l'étude sur le territoire de l'Arve, affiner l'échelle de projection est d'autant plus nécessaire que les Alpes sont et seront particulièrement impactées par le changement climatique et que les phénomènes locaux y sont très importants (ANEM, 2007).

Il est possible de situer la France dans les projections effectuées à l'échelle de l'Europe et donc de distinguer les grandes tendances d'évolution de la température et des précipitations, qui sont celles de l'Europe centrale. En revanche, à une échelle d'analyse comme celle du pays

ou de la région, le nombre de paramètres qu'il est possible d'étudier dans le détail est beaucoup plus important qu'à l'échelle globale. Nous n'allons pas présenter ici chaque paramètre et son évolution projetée selon des différents scénarios d'émissions. Il sera plus pertinent de s'intéresser à quelques variables particulièrement significatives en fonction de problématiques précises, lorsque nous nous intéresserons à l'application concrète des études sur le territoire de l'Arve. A ce stade, nous nous contenterons de présenter la nature des résultats les plus pertinents en termes d'échelle spatio-temporelle et les plus actualisés disponibles.

MODELES EXPLOITES

Ce sont les modèles de Météo-France (CNRM) et de l'IPSL qui sont utilisés dans le domaine des simulations françaises à haute résolution. Ces deux centres de recherche jouent un rôle décisif par le nombre, la fiabilité et l'accessibilité de leurs travaux, qui sont donc largement exploités.

En 2006, l'ONERC a commandé à Météo-France une série de simulations régionales réalisées avec la version 3 du modèle ARPEGE-Climat, afin de mettre à disposition sur son site Internet des cartes de l'évolution projetée de 24 indices climatiques de température, de précipitations et de vent (moyens et extrêmes). Deux scénarios contrastés du SRES ont servi au calibrage du modèle (A2 et B2). La simulation a été effectuée sur l'ensemble du XXI^{ème} siècle, par rapport à l'année de référence 1990. Les résultats se présentent sous la forme de moyennes annuelles et saisonnières par tranche de 20 ans. Il est ainsi possible de visualiser l'évolution de chacun des 24 indices, projeté en 2030, 2050 et 2090 par rapport à 1990. Des exemples de résultats sont donnés par les Figure 6 et Figure 7, qui présentent la répartition de la température moyenne hivernale et des précipitations moyennes annuelles.

TEMPERATURES ET PRECIPITATIONS

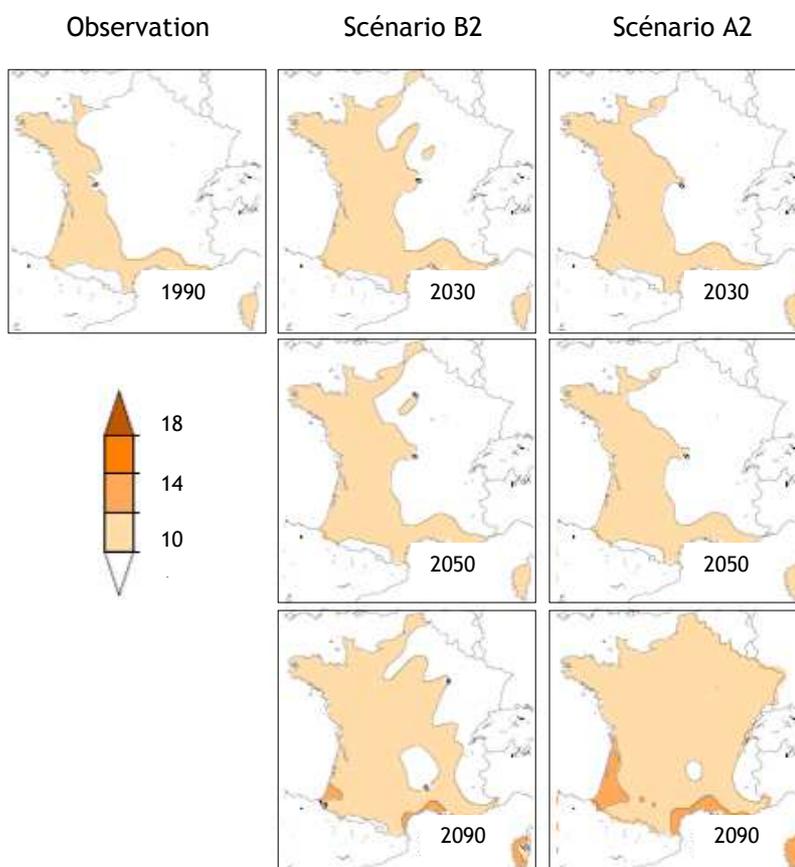


Figure 6 : Simulation de la répartition sur la France de la température moyenne hivernale (en °C)

(Source : www.ecologie.gouv.fr)

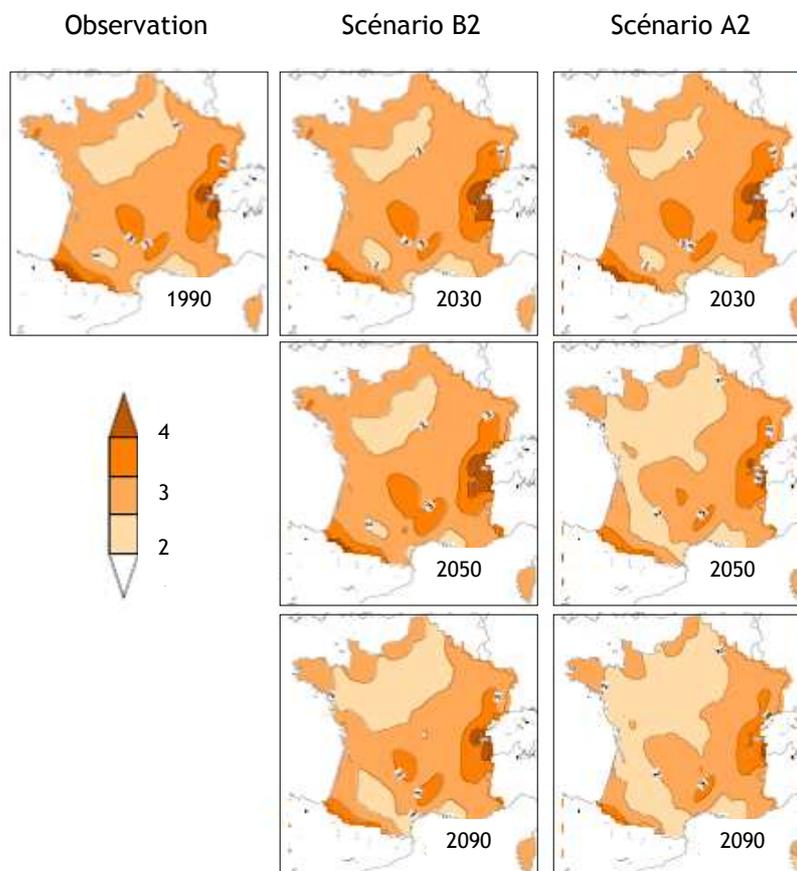


Figure 7 : Simulation de la répartition sur la France des précipitations moyennes annuelles (en mm/jour)

(Source : www.ecologie.gouv.fr)

On constate un important réchauffement hivernal et une diminution globale des précipitations, à l'instar de la tendance évoquée pour l'Europe centrale dans le rapport d'évaluation du GIEC. On voit aussi que les Alpes du nord correspondent aux zones les plus fraîches et les plus arrosées du pays. Néanmoins, si ces cartes fournissent des données pertinentes sur l'ensemble de la France métropolitaine, elles sont difficilement exploitables dans un contexte plus local et l'on ne parvient pas à dégager une évolution significative sur le territoire de l'Arve.

Pour une échelle d'analyse encore plus fine, l'ONERC propose un outil de simulation climatique très précis.

La série de données présentée dans ce simulateur est issue du même modèle numérique que la précédente, mais elle a subi une méthode de descente d'échelle différente¹⁶. Cet outil

¹⁶ Pour les indices climatiques, la méthode de correction a utilisé des données issues d'un modèle météorologique. Ici, ce sont les mesures de stations météorologiques qui ont été utilisées pour affiner l'échelle.

propose une synthèse interactive des simulations pour 4 paramètres essentiels du système climatique au niveau local : la température (minimale, maximale et moyenne), les précipitations, l'humidité du sol et le rayonnement solaire incident. Il s'agit pour chaque variable de données journalières moyennées sur l'année ou la saison. Les simulations sont réalisées sur une partie du XX^{ème} siècle (à partir de 1960) et la totalité du XXI^{ème} siècle. Elles sont faites pour les 210 mailles de la grille du modèle, dont 3 concernent le territoire de l'Arve (

Annexe 2). Les résultats sont proposés sous la forme d'un diagramme présentant l'évolution du paramètre sélectionné pour les scénarios A2 et B2, année par année. La simulation peut être obtenue pour chaque ville de France par extrapolation des données du centre de maille le plus proche. On obtient donc une échelle spatiale d'analyse extrêmement fine.

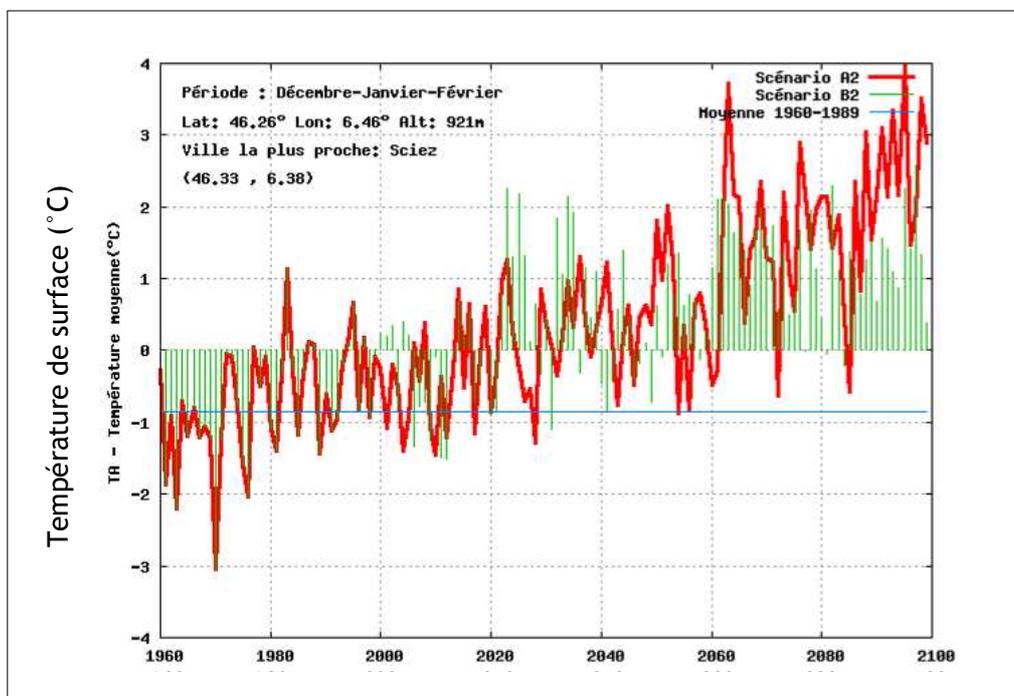


Figure 8 : Simulation de l'évolution de la température moyenne hivernale de 1960 à 2100, pour les scénarios A2 et B2

(Source : www.onerc.org)

La ligne bleue représente la moyenne simulée sur la période 1960-1989. Les hachures vertes correspondent aux simulations réalisées pour un scénario B2. La ligne rouge représente les simulations pour un scénario A2. Il s'agit de valeurs simulées pour un périmètre de 50 km² autour du centre de maille dont les coordonnées sont 46.26°N, 6.46°E, 921 m d'altitude. La ville la plus proche de ce point est la ville de Sciez (au nord, en marge du périmètre d'étude).

La Figure 8 donne un exemple de résultats. Notons que les valeurs de la période allant de 1960 à nos jours sont également le résultat de simulations. On constate que les variations locales de température (ici une augmentation de 2 à 3,5°C en hiver par rapport à la moyenne 1960-1989) peuvent être identifiées avec beaucoup plus de précision que sur les cartes d'indices climatiques (Figure 6). C'est pourquoi le simulateur climatique de l'ONERC est un outil sur lequel nous nous sommes souvent appuyés pour la suite de l'étude.

Il s'agit de simulations, qui peuvent guider la réflexion mais ne peuvent être considérées comme des prévisions du climat futur. Il s'agit en outre de simulations locales, qui nécessitent l'introduction de nombreuses composantes dans le modèle numérique. Or, plus on introduit de complexité, plus on introduit d'incertitude. Il faut donc utiliser ces simulations locales avec

prudence, en gardant à l'esprit qu'elles sont, certes, plus fines, mais aussi marquées par un degré de confiance moins important que les simulations globales.

I.3.3.d Synthèse sur les résultats des simulations d'évolution du système climatique

- Augmentation de la température moyenne annuelle de l'air en surface comprise entre 1,8 et 6,2°C en Europe, selon le scénario d'émissions considéré,
- Augmentation du niveau moyen de la mer comprise entre 0,18 et 0,59 m à l'échelle du globe, selon le scénario d'émissions considéré,
- Diminution des précipitations moyennes annuelles de -4 à -27 % en Europe centrale, selon le scénario d'émissions considérées : tendance à l'augmentation en hiver et à la diminution en été,
- Modélisations de la température plutôt fiables, modélisations des précipitations et des extrêmes plus incertaines,
- Modélisations globales et régionales plutôt fiables, modélisations locales plus incertaines.

I.3.4 Résultats à venir

Le projet français SCAMPEI (Scénarios Climatiques Adaptés aux zones de Montagne : Phénomènes Extrêmes, Enneigement et Incertitudes) devrait aussi fournir des résultats intéressants (Sources : www.cnrm.meteo.fr). Ayant débuté en janvier 2009 et devant s'achever en 2011, l'objectif de ce projet est d'apporter une réponse plus précise à la question du changement climatique dans les régions de montagne de France métropolitaine. Il s'agit d'un projet de modélisation de l'évolution du système climatique à haute résolution (12 km) selon une approche multi-modèles (Météo-France, IPSL et LGGE), afin notamment d'évaluer les incertitudes. Dans un second temps, une adaptation statistique de ces résultats sera réalisée sur une grille de données d'observation Météo-France de 8 km pour tenir compte au mieux de la complexité topographique et de la végétation des milieux montagnards. Les résultats seront synthétisés sous la forme d'indices de phénomènes extrêmes. Sur le plan des impacts, ce projet s'interrogera sur les questions relatives à la disponibilité de la neige, notamment en termes de tourisme et de ressource hydrique, et à la fréquence des phénomènes extrêmes tels que les longues sécheresses, les pluies intenses ou les vents forts. Cette étude prévoit en outre une analyse plus poussée sur les Alpes, afin d'évaluer de manière précise l'enneigement et les risques d'avalanches et de coulées de débris.

I.4 Conséquences potentielles en milieu montagnard

De nombreux travaux de recherche prennent le relais des équipes de modélisation afin de poursuivre l'analyse en termes d'impacts des évolutions climatiques sur les écosystèmes naturels et anthropisés, lesquels dépendent plus ou moins directement du climat et sont donc des composantes du système climatique. Il s'agit de mettre en évidence les interrelations existant entre le climat et ces écosystèmes, et ainsi de tenter de prévoir, avec un degré de confiance plus ou moins élevé, la réaction d'un phénomène face à l'évolution de tel ou tel paramètre climatique (principalement la température et les précipitations) dans un sens plutôt que dans un autre. Cette estimation prend appui sur les résultats des simulations climatiques et sur l'observation des évolutions actuelles. L'approche la plus couramment utilisée est là encore l'approche par scénarios. Les études aboutissent à des conclusions qualitatives fournissant des tendances d'évolution ou, plus rarement, à des résultats chiffrés fondés sur des scénarios quantifiés.

Les principaux domaines faisant l'objet de recherches sont la ressource en eau, les risques naturels, les milieux naturels, les activités agricoles et forestières, l'enneigement et le développement des territoires. Les principaux scénarios d'impacts pouvant toucher les zones de montagne de moyenne et haute latitude et pour lesquels le degré de confiance est le plus élevé sont présentés ci-dessous (Figures 12 à 24). Tous les scénarios partent de l'hypothèse d'une augmentation non quantifiée de la température de l'air, principale manifestation attendue du changement climatique.

I.4.1 Impacts potentiels du changement climatique sur les phénomènes naturels

En milieu montagnard, les phénomènes naturels structurants pour les territoires sont essentiellement les phénomènes de précipitations/évaporation conditionnant la disponibilité en eau, les risques naturels et l'enneigement. L'étude de P. Etchevers et E. Martin (2002) présente les impacts potentiels sur l'hydrologie et l'enneigement.

Le projet européen ClimChAlp constitue quant à lui la principale source d'informations concernant la question des risques naturels (ClimChAlp, 2008b). Le rapport identifie 6 types majeurs de risques dans les Alpes : les crues, les avalanches, les aléas torrentiels, les aléas glaciaires, les mouvements de terrain et les feux de forêt. Mais les risques naturels sont des phénomènes complexes qui se manifestent rarement seuls. Il n'est ainsi pas rare que les conséquences d'un phénomène entraînent le déclenchement d'une série de phénomènes associés. La complexité de fonctionnement des risques naturels en montagne rend difficile la

prévision de leur évolution. Cette difficulté est d'autant plus grande que l'on n'observe actuellement aucune tendance significative pouvant être liée avec certitude au changement climatique.

I.4.1.a Modifications des précipitations et impacts sur la ressource en eau, l'enneigement et les crues

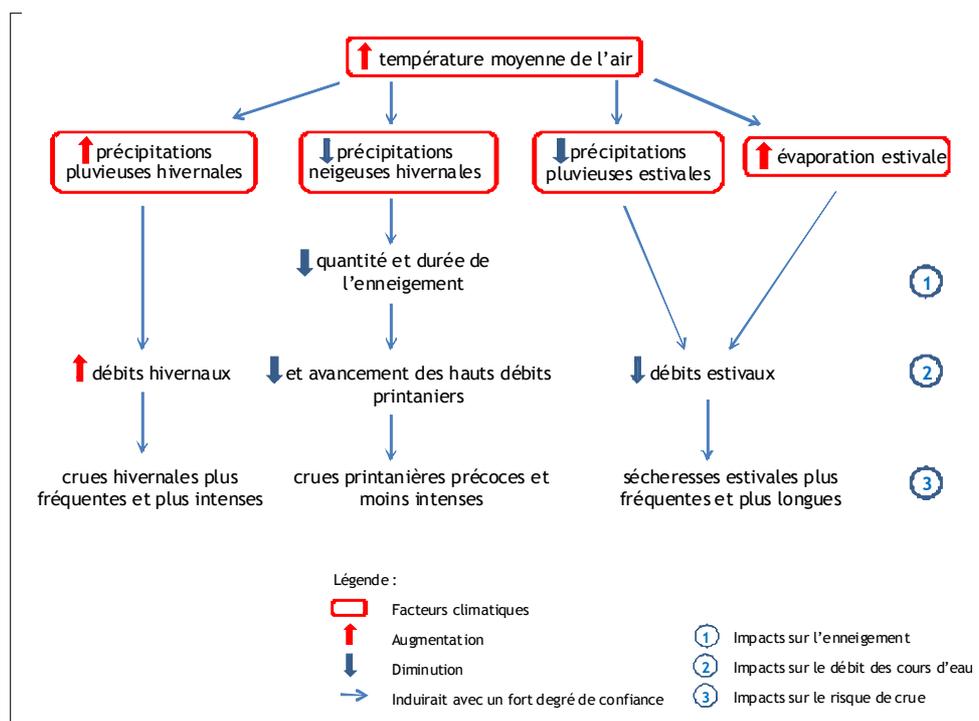


Figure 9 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'enneigement, la disponibilité de la ressource en eau et le risque de crue

La Figure 9 est une représentation simplifiée du lien qui existe entre la température, la nature et la répartition des précipitations, les débits des cours d'eau et les phénomènes de crue. D'autres paramètres entrent en compte (l'altitude a par exemple une influence sur la nature des précipitations), mais nous avons préféré rester synthétiques dans un premier temps, puisque les questions de la ressource en eau et de l'enneigement feront l'objet d'un développement propre.

Les modélisations concernant le régime des précipitations sont marquées par de fortes incertitudes. Toutefois, les résultats s'accordent sur les grandes tendances illustrées par la Figure 9 pour le continent européen. La hausse de la température devrait renforcer le cycle hydrologique. On peut ainsi s'attendre à une modification du ratio hivernal précipitations solides/précipitations liquides qui induira une diminution probable de la quantité de neige et donc une extension spatiale moindre et une fonte plus rapide. La fonte sera en outre précoce, en lien notamment avec l'augmentation de la température (P. Etchevers et E. Martin, 2002). Cette modification du ratio pluie/neige est à l'origine d'une variation quantitative des débits et donc du risque de crue hivernale. En été, le régime des précipitations et de l'évaporation

induirait des étiages plus sévères et un risque plus important de sécheresse associée (ClimChAlp, 2008b et Figure 10). L'alimentation des nappes souterraines et de leurs exutoires devrait connaître une évolution proche de celle des débits des cours d'eau, avec cependant un délai de réaction plus ou moins important selon le degré de dépendance des nappes à la pluviométrie.

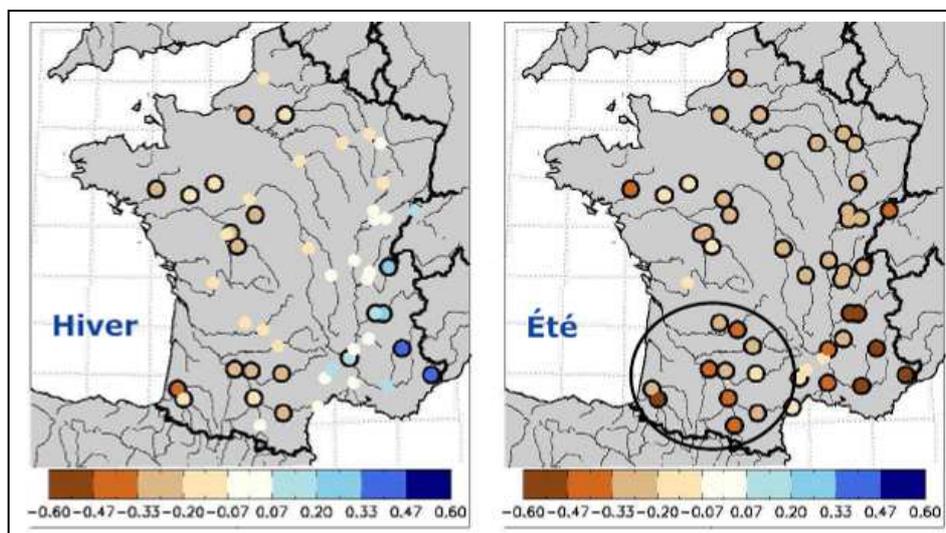


Figure 10 : Changement relatif en % des débits en 2050 par rapport à 1970-2000

Source: CERFACS/Météo-France 2007

Concernant les événements météorologiques extrêmes, il est probable qu'un changement climatique ait des impacts sur leur fréquence et/ou leur intensité. Mais les projections des extrêmes sont encore plus complexes et donc incertaines. On peut néanmoins s'attendre à une augmentation de la fréquence des précipitations extrêmes en hiver et donc des inondations. En parallèle, le risque de sécheresse estivale est susceptible d'augmenter.

Synthèse

- Diminution potentielle de l'enneigement en lien avec la modification du ratio précipitations liquides/solides en hiver,
- Modifications des débits saisonniers des cours d'eau en lien avec la modification du régime des précipitations et de l'évaporation,
- Modification de la fréquence et de l'intensité des crues saisonnières en lien avec la modification des débits saisonniers.

I.4.1.b Modifications glaciaires et impacts sur les avalanches

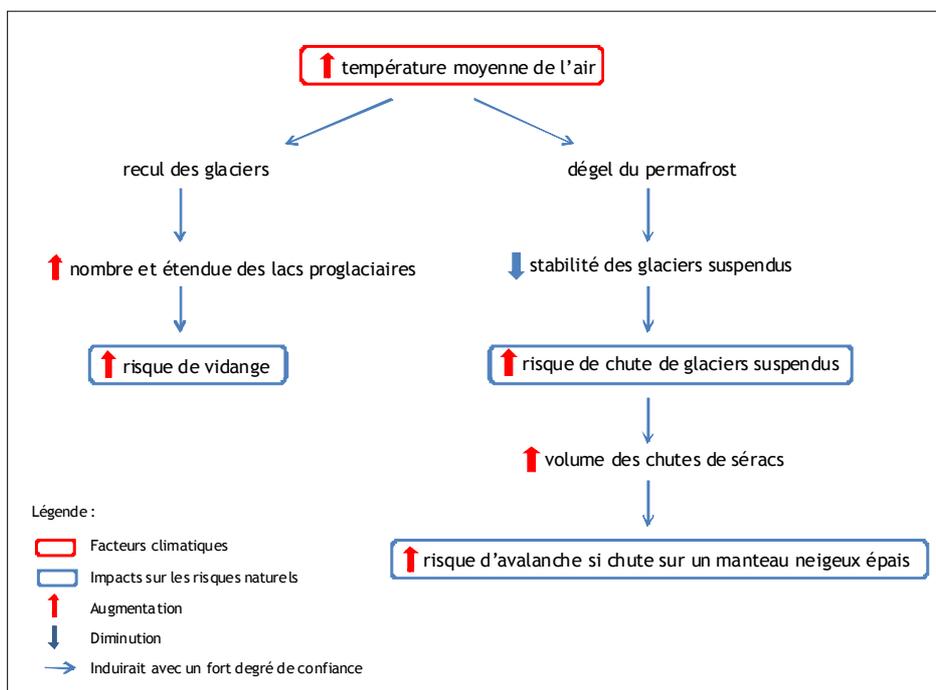


Figure 11 : Impacts potentiels du changement climatique sur les aléas glaciaires et les avalanches

Des hypothèses sont émises selon lesquelles l'accélération du retrait glaciaire consécutif à un réchauffement du climat pourrait conduire à une augmentation de la formation de tous les lacs glaciaires, sans distinction. Mais l'influence des conditions climatiques sur la formation des lacs supraglaciaires, des lacs de gouttière et des lacs de confluence est aujourd'hui mal connue. Ainsi, comme le montre la Figure 11, seule l'augmentation du nombre et de l'étendue des lacs proglaciaires, en lien avec un recul marqué des glaciers, est établie. En outre, le passage d'un mode « froid » (où le glacier adhère au socle rocheux grâce aux températures basses de sa base) à un mode « tempéré » (où des écoulements liquides peuvent lubrifier la base du glacier), associé à un dégel du permafrost (favorisé par la diminution de la couverture neigeuse et donc de l'isolement du sol), serait la principale influence du changement climatique sur les glaciers suspendus et leur stabilité. Ceci est d'autant plus inquiétant qu'un réchauffement des glaciers froids situés aux hautes altitudes a été mis en évidence dans les Alpes. Des sites « à risque » ont ainsi pu être identifiés sur le territoire de l'Arve (Dôme du Goûter et Glacier de Tacconnaz, massif du Mont-Blanc), où les chutes de séracs provoquent déjà des avalanches (ClimChAlp, 2008b).

I.4.1.c Modifications glaciaires et impacts sur les laves torrentielles et les crues

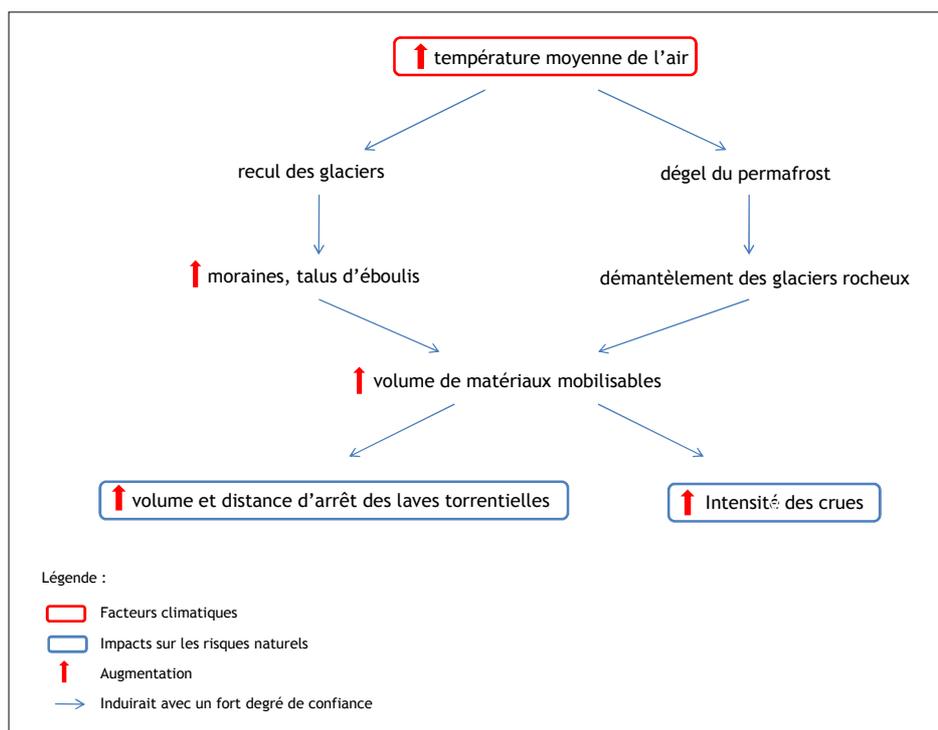


Figure 12 : Impacts potentiels du changement climatique sur les aléas torrentiels et les crues

Les aléas torrentiels et leurs facteurs déclenchant et aggravant sont difficiles à observer. En outre, il s'agit de phénomènes marqués par de très fortes variabilités spatiale et temporelle (ClimChAlp, 2008b). Leur évaluation est donc malaisée. Pourtant, il s'agit d'enjeux importants en termes de gestion des territoires de montagne. On voit sur la Figure 12 que la disponibilité en matériaux est le facteur critique qui pourrait induire un changement futur de l'intensité des laves torrentielles, avec des volumes et des distances d'arrêt plus importants. Des matériaux qui seraient d'autant plus facilement mobilisables sur les pentes fortes. Ainsi, les espaces de haute montagne déjà touchés par les laves torrentielles pourraient voir ces phénomènes prendre de l'ampleur, tandis que des zones jusqu'à présent protégées pourraient devenir plus propices aux laves torrentielles que par le passé. Il est délicat de se prononcer sur l'évolution potentielle de la fréquence de ces phénomènes, car elle pourrait augmenter dans certaines régions et diminuer dans d'autres en fonction des caractéristiques locales (altitude, présence de permafrost, etc.). Notons que l'évolution des laves torrentielles dépendra aussi largement de l'évolution de l'occurrence des précipitations intenses, difficile à évaluer.

I.4.1.d Modifications de la température et impacts sur les feux de forêt

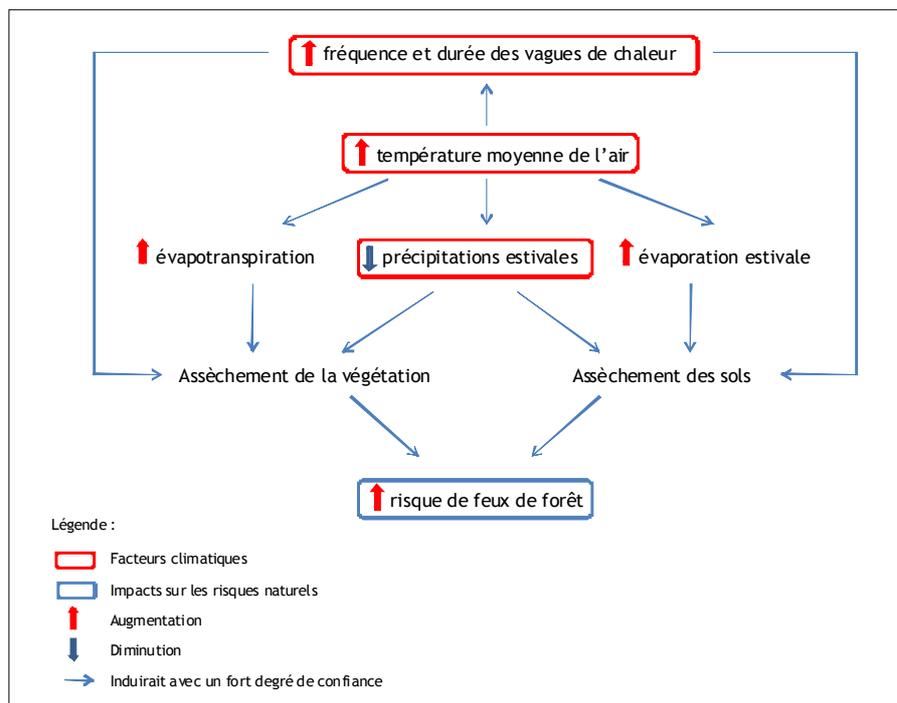


Figure 13 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur le risque de feux de forêt

La dynamique des feux de forêts est influencée par de nombreux paramètres climatiques : température, précipitations, durée d'ensoleillement, événements de Foehn et humidité relative. Les simulations climatiques portent surtout sur les variations de température et de précipitations, c'est pourquoi les scénarios d'impacts incluent essentiellement ces deux variables, comme on peut le constater sur la Figure 13. On note que les conditions de prédisposition aux feux de forêt évoluent également avec les phénomènes climatiques extrêmes de sécheresse. Ainsi, des conditions plus sèches en été pourraient augmenter le risque de feux dans les massifs montagneux pendant la période estivale. Le rapport de l'ONERC (2008) rappelle néanmoins l'importance de la dimension humaine dans le déclenchement des feux de forêts et souligne l'influence des conditions de la végétation, qui seront-elles-mêmes impactées par l'évolution du climat.

I.4.1.e Modifications de la température, des précipitations et des processus glaciaires et impacts sur les mouvements de terrain

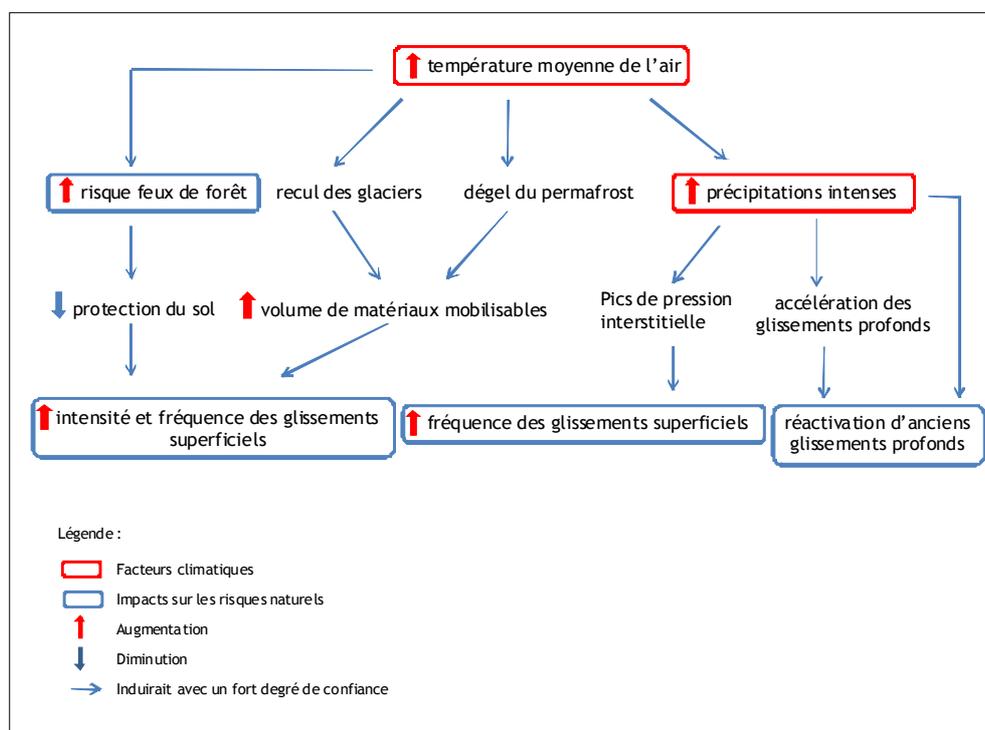


Figure 14 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les mouvements de terrain

On constate sur la Figure 14 que les facteurs pouvant déclencher des mouvements de terrain sont multiples. La stabilité des sols et donc leurs conditions d'humidité (Figure 13, évolution probable de l'humidité des sols dans le contexte d'un changement climatique) et d'occupation, le régime des précipitations ainsi que les cycles de gel/dégel entrent en compte dans la fréquence d'occurrence des mouvements de terrain, et des aléas gravitaires dans leur ensemble¹⁷. L'intensité des mouvements de terrain est quant à elle étroitement liée au volume de matériaux mobilisables. On retrouve ici des paramètres déjà évoqués pour les risques naturels précédents, ce qui confirme l'interdépendance des phénomènes entre eux et la complexité à prévoir leur évolution.

Dans son étude de cas sur le massif alpin, l'ONERC (2008) synthétise ces informations sur les risques naturels et leur évolution dans le contexte d'un changement climatique sous la forme d'un tableau présentant le degré de confiance accordé aux projections d'impacts. En voici un extrait pour les risques précédemment considérés (Tableau 3) :

¹⁷ Le terme d'aléa gravitaire regroupe un grand nombre de phénomènes aux caractéristiques diverses. Les aléas gravitaires les plus fréquemment rencontrés en zone de montagne sont les avalanches, les coulées torrentielles, les mouvements de terrain et les chutes de blocs. (<http://www-old.cemagref.fr>)

RISQUES NATURELS CONCERNES	MODIFICATIONS PROJETEES	DEGRE DE CONFIANCE	REGIONS LES PLUS TOUCHEES
RISQUES LIES AU PERGELISOL	Augmentation de la fréquence des éboulements et de l'intensité des laves torrentielles	Très élevé	Haute montagne
RISQUES LIES AUX LACS GLACIAIRES	Accroissement de l'incidence des inondations par vidange de lacs glaciaires	Très élevé	Haute montagne
CRUES HIVERNALES	Augmentation en intensité et en fréquence	Moyen	Basse montagne
FEUX DE FORET	Augmentation en fréquence	Moyen	Basse montagne dans les Alpes du sud
GLISSEMENTS DE TERRAIN ET LAVES TORRENTIELLES	Augmentation en intensité et en fréquence	Moyen/Faible	Basse et moyenne montagne
AVALANCHES	Augmentation en intensité et en fréquence	Faible	Haute montagne

Tableau 3 : Synthèse des impacts potentiels d'un changement climatique sur les risques naturels dans le massif alpin selon le degré de confiance accordé aux projections

(Source : ONERC, 2008)

1.4.2 Impacts potentiels d'un changement climatique sur les milieux naturels

Dans le contexte montagnard, les conséquences du changement climatique sur les milieux naturels se manifestent essentiellement en termes de répartition des espèces végétales et animales et de qualité des eaux et des milieux aquatiques. Le projet ClimChAlp synthétise là encore les principaux éléments de réflexion (ClimChAlp 2008b), de même que la contribution du Groupe de travail II au 4^{ème} rapport d'évaluation du GIEC (GIEC, 2007d).

I.4.2.a Espaces et espèces naturels en milieu terrestre

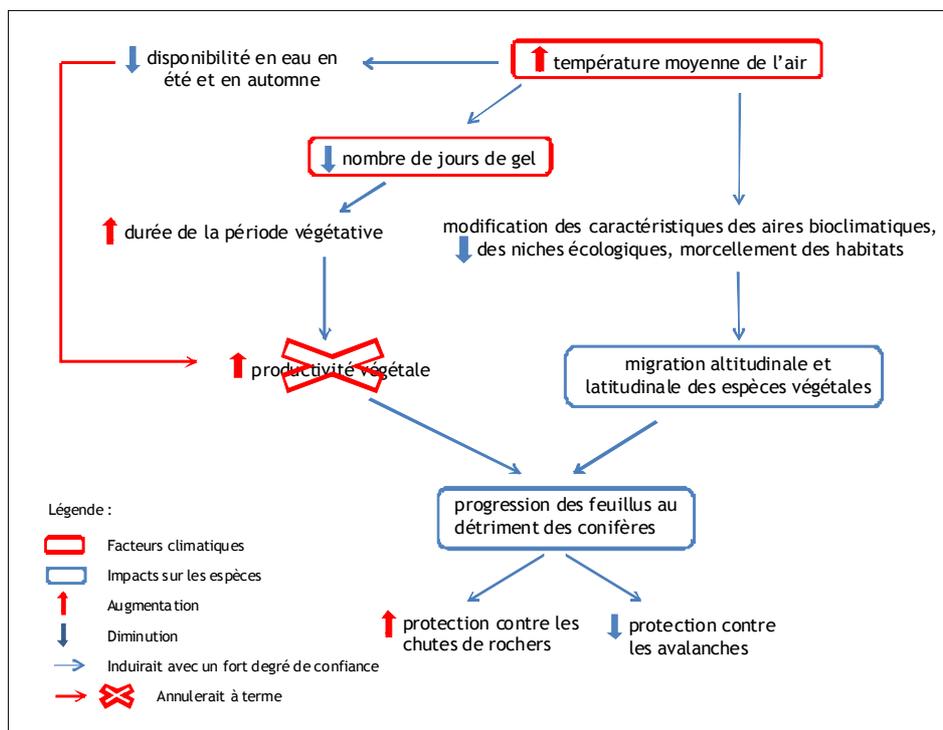


Figure 15 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces végétales et les risques associés

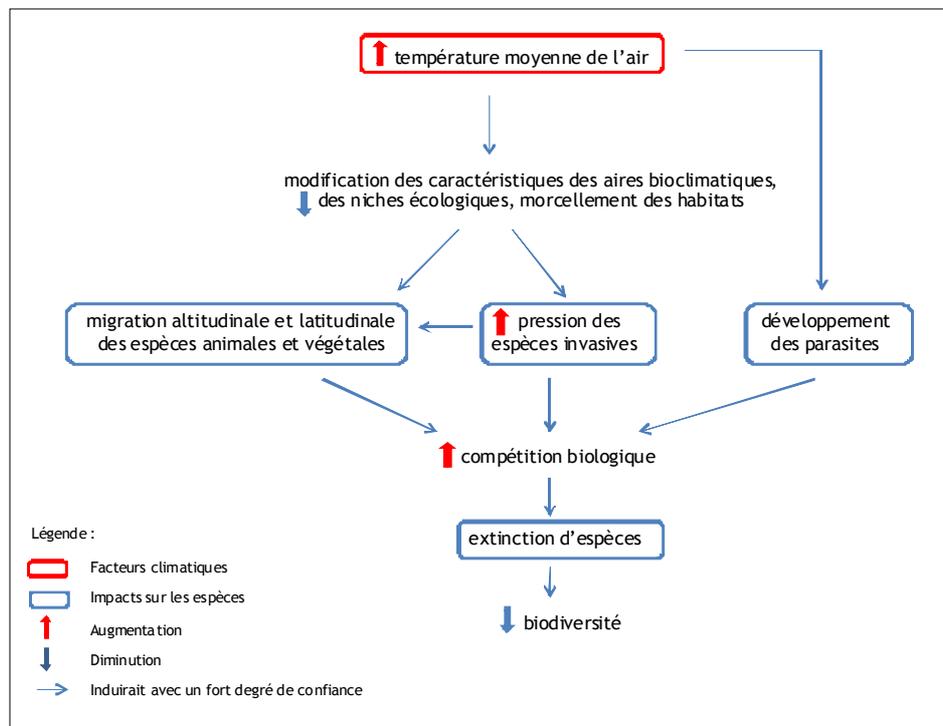


Figure 16 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces animales et végétales et sur la biodiversité

La Figure 15 illustre le double aspect du terme impact, qui peut être négatif ou positif. En effet, une augmentation de la température aurait pour conséquence de diminuer le nombre de jours de gel, qui est un facteur particulièrement limitant pour la croissance végétale en

montagne. Cette diminution du nombre de jours de gel, associée à un probable accroissement de la concentration atmosphérique en CO₂, favoriserait l'allongement de la période végétative. Mais à partir d'un certain seuil, les impacts bénéfiques seraient probablement contrebalancés par une réduction de la disponibilité en eau (diminution des débits estivaux et automnaux, en lien avec une fonte plus rapide de la neige et des précipitations moindres, Figure 9), pénalisante pour la productivité végétale.

Concernant le couvert forestier, on peut s'attendre à une progression des aires bioclimatiques océanique et méditerranéenne en parallèle d'une régression importante des aires bioclimatiques de montagne. Cela se traduirait dans les zones de montagne par la progression des feuillus au détriment des conifères. Les répercussions sur la protection face aux phénomènes d'avalanches et de chutes de rochers s'expliquent par le fait que le tronc des feuillus est plus résistant mais que les conifères assurent une meilleure stabilisation du manteau neigeux.

Enfin, les Figure 15 et Figure 16 montrent que la répartition des espèces montagnardes pourrait également être impactée. La réponse naturelle de la végétation à un réchauffement climatique serait en effet de migrer en altitude (pour chaque degré d'augmentation, la migration est estimée à environ 150 m (ClimChAlp, 2008b)) et en latitude (remontée des espèces vers le nord). Cependant, les espèces qui sont déjà localisées à la limite de leur tolérance climatique pourraient ne pas avoir d'espace où migrer. De plus, les espèces endémiques ont généralement une tolérance climatique limitée comparée à celle des espèces envahissantes. La pression exercée par les espèces invasives serait donc accrue, de même que la pression exercée par le développement des parasites et de leurs vecteurs. Les impacts les plus importants pourraient se situer aux étages alpin et nival, où l'on trouve un grand nombre d'espèces rares (ONERC, 2008).

I.4.2.b Espaces et espèces naturels en milieu aquatique

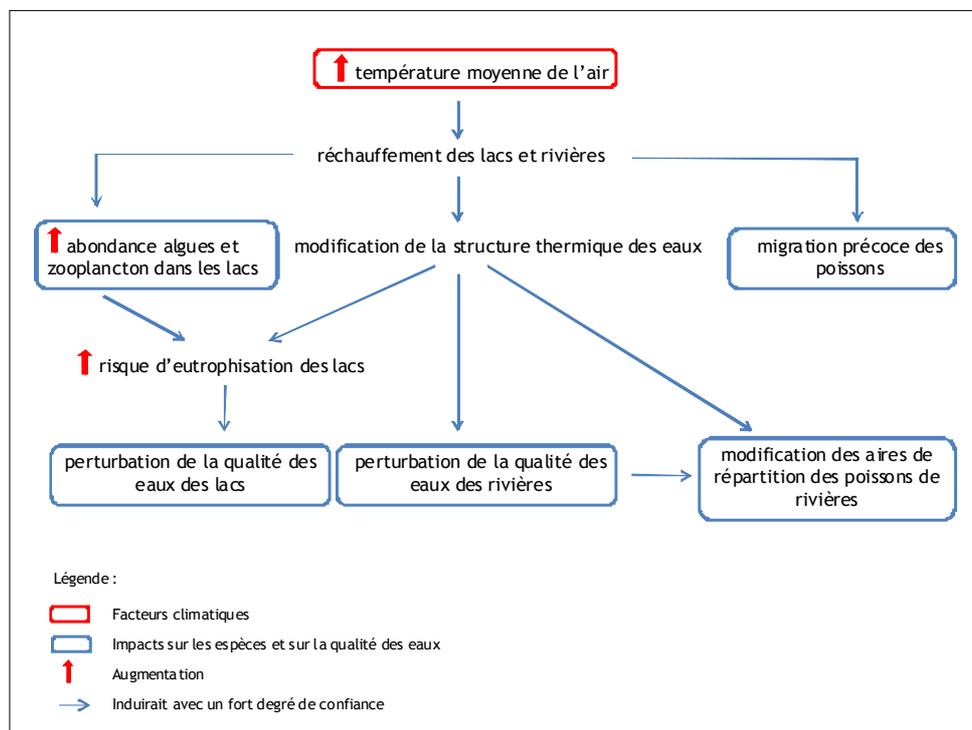


Figure 17 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les espèces et les milieux aquatiques

On constate sur la Figure 17 qu'un réchauffement climatique aurait des impacts sur la température des eaux douces et donc sur les systèmes biologiques associés. Il s'agirait d'impacts quantitatifs (changements dans l'abondance d'algues, de plancton et de poissons dans les lacs de haute altitude) et qualitatifs (perturbation de la structure thermique et de la qualité des eaux, variations dans les aires de répartition et les périodes de migration des espèces). Notons que le risque d'impact d'un changement climatique sur les systèmes marins est également élevé. Les zones de montagne n'étant pas concernées par ces systèmes, la Figure 17 ne présente pas ces types d'impacts. On peut néanmoins mentionner que le réchauffement des eaux, combiné à des changements dans la couverture de glace, la salinité, les taux d'oxygène et la circulation marine, pourra entraîner des modifications du niveau de la mer dans le sens d'une élévation ainsi qu'une acidification des océans liée à l'augmentation du gaz carbonique atmosphérique (-0,1 de pH en moyenne d'ici la fin du XXI^{ème} siècle, mais dont les effets sur la biosphère marine sont encore mal connus) (GIEC, 2007d).

I.4.2.c Synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur les milieux naturels

- Modification des aires bioclimatiques de répartition des espèces,
- Pression accrue des espèces invasives et parasites,
- Compétition biologique accrue et perte de biodiversité,
- Perturbation de la qualité des eaux de surface en lien avec leur réchauffement.

I.4.3 Impacts potentiels d'un changement climatique sur les activités socio-économiques

Les travaux du GIEC pour son 4^{ème} rapport d'évaluation (GIEC, 2007d) et de l'ANEM (ANEM, 2007), ainsi que l'étude menée par l'ONERC sur les aspects économiques des impacts du changement climatique (Groupe Agriculture et Groupe Tourisme) (ONERC, 2008) fournissent des renseignements actualisés sur la question des conséquences possibles d'un changement climatique sur les principales activités anthropiques des zones de montagne, à savoir, l'agriculture, la sylviculture et le tourisme.

I.4.3.a Activités forestières

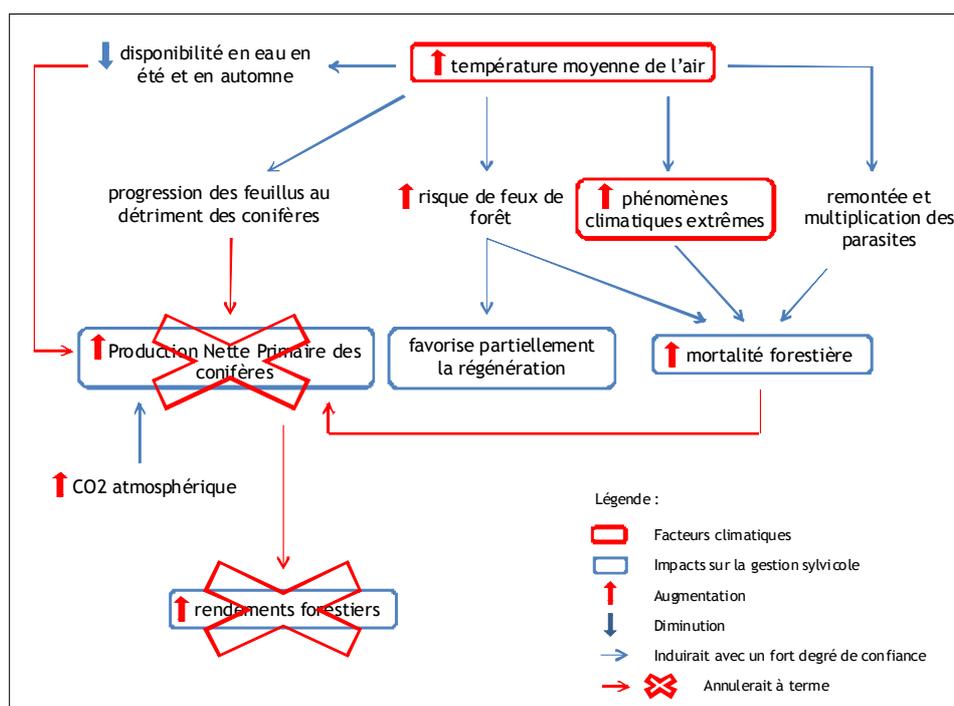


Figure 18 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur la gestion sylvicole

Concernant la gestion sylvicole, le rapport de l'ONERC conclut à des impacts importants dès le court terme, étant donné la sensibilité des forêts aux perturbations exceptionnelles comme à l'évolution du climat moyen. La Figure 15 suggérerait une modification des aires de répartition des grandes essences forestières. Mais il est probable que la plupart des essences ne parviennent pas à migrer assez vite par rapport à la rapidité de l'évolution des conditions climatiques (ONERC, 2008). En outre, les essences maintenues hors de leur aire de répartition potentielle connaissent une vulnérabilité plus grande et une productivité moindre. La Figure 18 montre que la Production Nette Primaire (PNP) des conifères devrait augmenter dans un premier temps, en réponse à l'accroissement de la concentration atmosphérique en CO₂ (favorisant l'activité photosynthétique). Sur le moyen et le long terme, cette augmentation de la productivité forestière devrait être contrée par une moindre disponibilité saisonnière en eau et donc un phénomène de stress hydrique. En outre, la modification des régimes de perturbation par les feux de forêt (le risque incendie pourrait apparaître dans des zones aujourd'hui épargnées), par les parasites et par les phénomènes climatiques extrêmes (sécheresses, précipitations intenses, tempêtes de vent, etc.) aurait pour effets, à terme, d'augmenter la vulnérabilité des forêts aux perturbations et donc leur mortalité des forêts, et de diminuer leur capacité de résilience.

I.4.3.b Activités agricoles

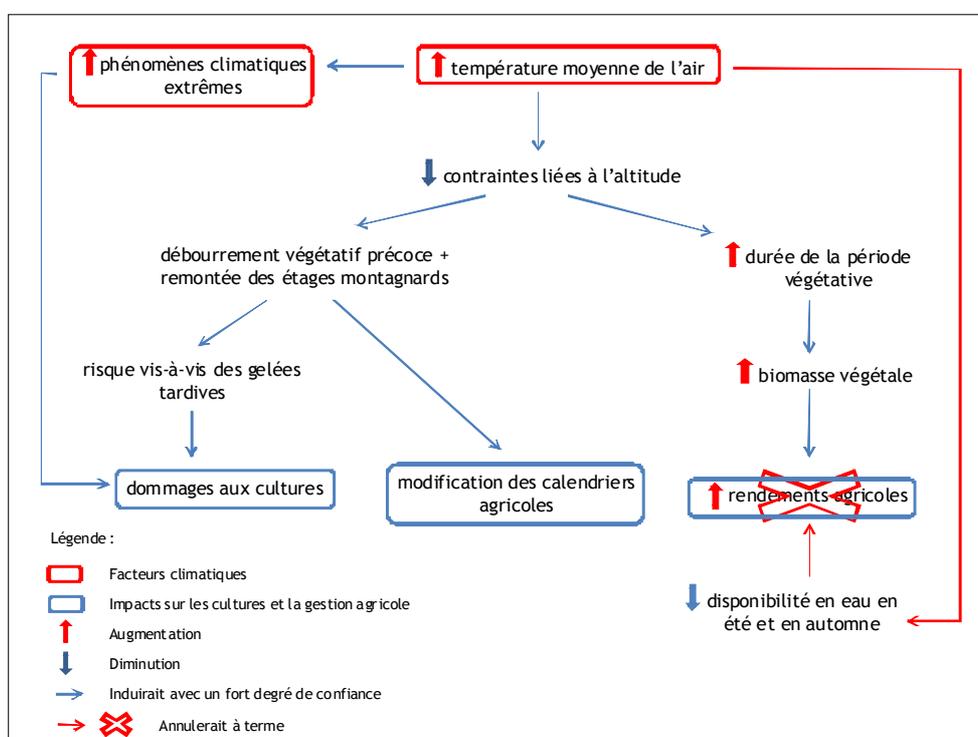


Figure 19 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur les cultures

En montagne, les perspectives sur le secteur agricole sont a priori moins alarmistes que pour d'autres zones géographiques, car un réchauffement, associé à une amélioration de

l'ensoleillement, aurait tendance à atténuer les contraintes climatiques (ANEM, 2007). On peut donc s'attendre à une légère augmentation de la biomasse végétale et donc des rendements, favorisée par la croissance attendue de la teneur de l'atmosphère en CO₂. Mais cet effet positif ne devrait se réaliser que pour des augmentations moyennes locales de température allant jusque + 1 à + 3°C selon la culture considérée. Au-delà, on assisterait à une diminution des rendements (GIEC, 2007d). En outre, la gestion agricole devra s'adapter à un débourrement précoce lié à l'augmentation de la température (Figure 19) et à une diminution probable de la couverture neigeuse. Les plantations devront être effectuées plus tôt dans l'année, de même que les premières coupes. Par exemple, les premières coupes de luzerne pourraient être avancées d'une dizaine de jours à 500 m d'altitude et d'une quinzaine de jours autour de 1 500 m (ANEM, 2007). Enfin, les impacts des phénomènes extrêmes, climatiques (ex : canicules) ou naturels (ex : mouvements de terrain) sont susceptibles d'être plus significatifs encore (ONERC, 2008).

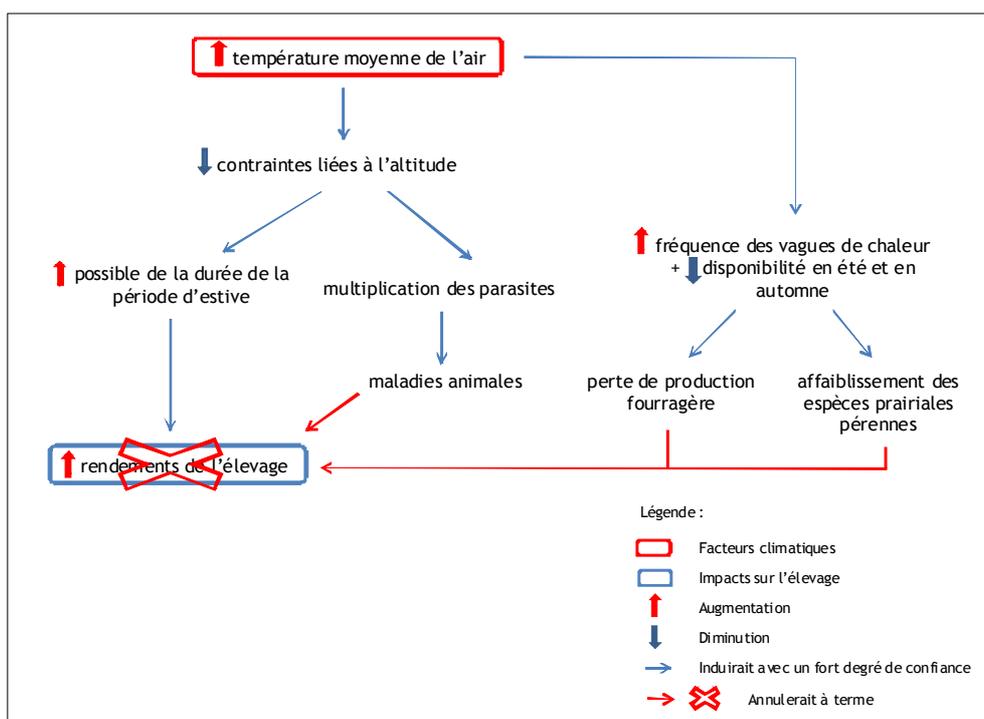


Figure 20 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'activité d'élevage

Les systèmes d'élevage seraient concernés par un phénomène de changement climatique car la diminution des contraintes liées à l'altitude offrirait la possibilité de prolonger la période d'estive. Mais la sensibilité du secteur de l'élevage aux vagues de chaleur, aux phénomènes de stress hydrique et aux maladies viendrait contrer les effets positifs potentiels d'un réchauffement sur les rendements.

La forte régionalisation des impacts qui toucheraient l'agriculture pourrait résulter en des effets très inégaux au sein du secteur et donc à des difficultés pour tirer des conclusions globales (ONERC, 2008).

I.4.3.c Activités touristiques

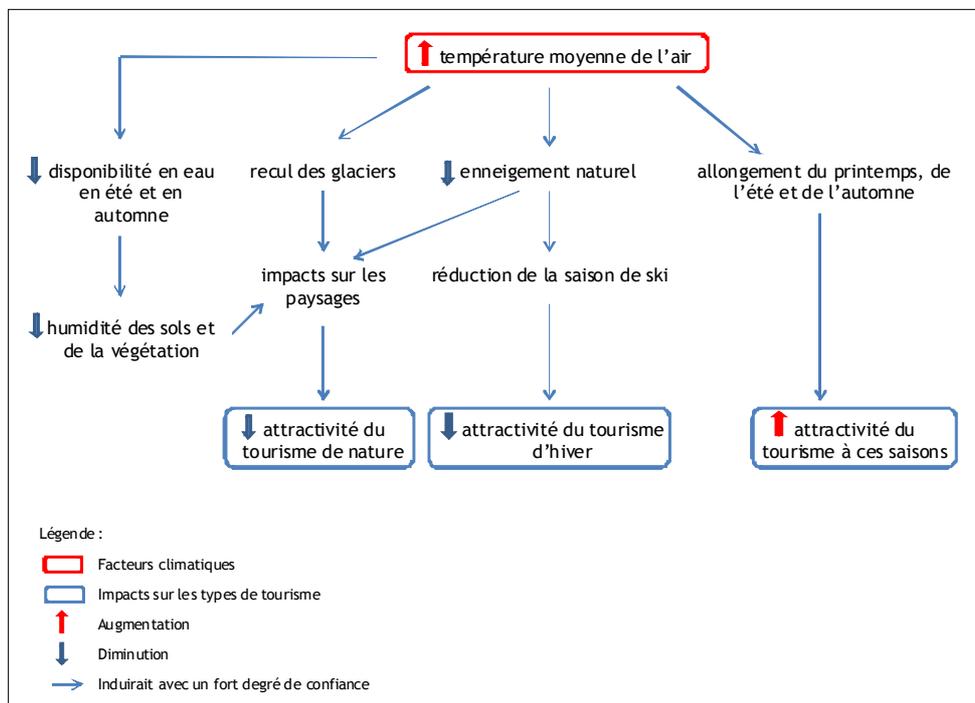


Figure 21 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur l'attractivité des différents types de tourisme

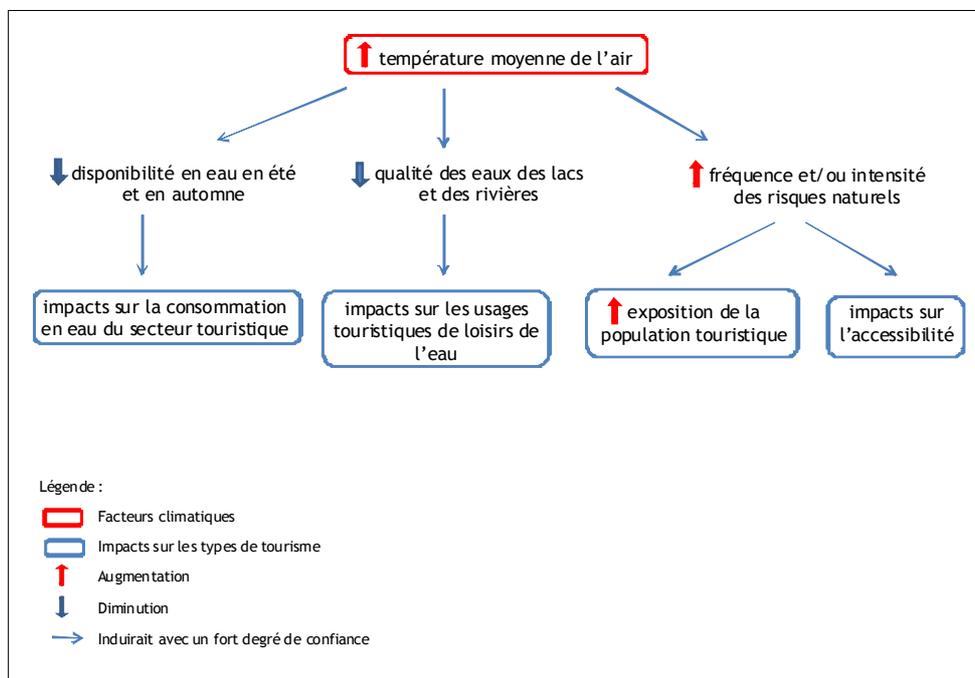


Figure 22 : Impacts potentiels d'un changement climatique sur des composantes majeures du secteur touristique

Les Figure 21 et Figure 22 montrent que le secteur touristique dépend de nombreuses variables qui sont sous l'influence plus ou moins directe du climat. L'une des conséquences principales pourrait être la modification de la répartition, dans le temps comme dans l'espace, des flux touristiques en fonction de l'évolution de l'attractivité des différents lieux et types de

tourisme. Le déficit probable d'enneigement jouerait en défaveur du tourisme d'hiver, qui est aujourd'hui l'objet d'un quasi monopole touristique dans les zones de montagne. Au contraire, la hausse des températures printanières et estivales et l'amélioration de l'ensoleillement pourraient favoriser l'attractivité des montagnes aux autres saisons que l'hiver, d'autant que les températures resteraient plutôt fraîches en comparaison de celles des zones méditerranéennes. Mais les impacts d'un changement climatique sur la biodiversité et les paysages sont aussi à prendre en compte car ils constituent l'image de marque des espaces montagneux. Enfin, les touristes et les infrastructures touristiques consomment de l'eau (hébergement, eau potable, équipements de loisirs, production de neige de culture, etc.) et sont exposés aux risques naturels (notamment les inondations, les glissements de terrain, les avalanches et les feux de forêt), ce qui fait dépendre le secteur de l'évolution de la ressource en eau et des risques naturels et de leur gestion.

I.4.3.d Synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur les activités socio-économiques

- Croissance, à court terme, des rendements sylvicoles et agricoles, puis décroissance à moyen et plus long terme, notamment en lien avec la disponibilité de la ressource en eau et le régime des phénomènes extrêmes,
- Modification des calendriers agricoles en lien avec la diminution des contraintes altitudinales,
- Diminution de l'attractivité du tourisme d'hiver, en lien avec un enneigement moindre,
- Augmentation de l'attractivité estivale en lien avec des températures plus hautes et un meilleur ensoleillement,
- Plus grande vulnérabilité du secteur touristique à la ressource en eau et aux risques naturels.

Ces domaines d'impacts sont tous plus ou moins directement liés à l'eau et ont donc leur place dans une réflexion sur le futur SAGE Arve. On a aussi noté que des recoupements doivent être faits entre les différents domaines d'étude, qui constituent autant de composantes d'un même système (le système climatique au sens large). Il est donc nécessaire d'adopter une démarche d'analyse par effets combinés, des phénomènes naturels entre eux et des phénomènes naturels avec leurs conséquences sur les activités anthropiques. Cette démarche, certes, complexifie l'analyse, mais elle permet de prendre en compte les effets directs des évolutions climatiques sur la température, les précipitations, ou encore le vent, mais aussi leurs effets indirects sur les autres pressions qui pèsent sur un milieu. Certains phénomènes pourront se compenser, d'autres se cumuler, et c'est le résultat de ces interactions qui permettra de hiérarchiser les risques et de prioriser les actions associées.

II Analyse contextuelle : réflexions sur des conséquences potentielles sur la ressource en eau du territoire du SAGE

Les scénarios d'évolution de la ressource dans le contexte d'un changement climatique sont aujourd'hui marqués par une forte incertitude et restent du domaine de l'hypothèse qualitative plus ou moins probable.

L'eau est, cependant, un élément déterminant pour l'établissement de l'homme et le développement de ses activités. Il s'agit de l'eau en tant que support des usages anthropiques (prélèvements, dilution des rejets, activités de loisirs), support de la vie aquatique, et acteur du façonnement des paysages. Cette place centrale de l'eau est renforcée dans l'espace montagnard, généralement considéré comme le « château d'eau » des territoires situés en aval. L'eau et son écoulement jouent aussi un rôle crucial dans le déclenchement et l'intensité de nombreux risques naturels, notamment les aléas gravitaires et le risque de crue, fréquents en zone de montagne (ANEM, 2007). C'est pourquoi la question de l'impact d'un changement climatique sur la ressource en eau se pose sur le territoire du SAGE, aux décideurs politiques, comme aux aménageurs du territoire et gestionnaires de l'eau.

Les incertitudes demeurant à l'échelle locale justifient de travailler sur des scénarios potentiels d'évolution, sans qu'il soit possible ni nécessaire de préciser lequel a la plus forte probabilité d'occurrence. Cela permet néanmoins d'identifier les modifications auxquelles on peut s'attendre et donc les paramètres à suivre afin de détecter, à terme, d'éventuelles tendances et ainsi préciser la vraisemblance des hypothèses. Le relativement faible degré de confiance attribué aux simulations locales d'évolution des paramètres climatiques, notamment concernant les précipitations, incite à préférer une réflexion qualitative portant sur des tendances. Des estimations chiffrées sont néanmoins proposées lorsque la littérature le permet.

L'analyse s'intéresse ici à l'aspect quantitatif de la ressource : débits et prélèvements actuels sur le territoire, ainsi que leur évolution possible, afin de détecter d'éventuelles pressions (actuelles ou à venir) et donc une adaptation nécessaire de la gestion de la ressource. Il est cependant probable qu'un changement climatique aurait aussi des conséquences sur la qualité de l'eau et des milieux aquatiques, ainsi que sur les autres usages de l'eau (paysager, piscicole, etc.).

II.1 Pluviométrie, régimes hydrologiques et débits des cours d'eau

Le rapport d'état initial du SAGE présente le régime pluviométrique actuel du territoire du SAGE et des régimes hydrologiques actuels et débits associés.

II.1.1 Régime pluviométrique actuel

Cf. paragraphe I.2.3 du rapport d'« Etat Initial ».

II.1.2 Régimes hydrologiques et débits associés actuels

Cf. paragraphe II.3.2 du rapport d'« Etat Initial ».

L'essentiel des informations sur les régimes hydrologiques du territoire du SAGE est synthétisé dans le Tableau 4, qui met en évidence les périodes de hautes eaux et les périodes d'étiage ainsi que la cause de ces variations de débit.

REGIME	BASSES EAUX	CAUSE	HAUTES EAUX	CAUSE
GLACIAIRE	hiver	Rétention nivale et glaciaire	été	Fonte nivale + fusion glaciaire ensuite
NIVAL	hiver	Rétention nivale	printemps-été	Fonte nivale à moyenne altitude, voire ensuite influence glaciaire
NIVO-PLUVIAL	été	Précipitations faibles et fin de la fonte nivale	printemps	Fonte nivale à moyenne altitude
	hiver	Rétention nivale		
PLUVIAL	été	Précipitations faibles	hiver	Précipitations fortes

Tableau 4 : Synthèse des régimes hydrologiques du territoire de l'Arve

La suite de l'analyse prendra essentiellement appui sur les débits moyens, en lien avec des conditions climatiques habituelles. En effet, aucune tendance significative n'a jusqu'à présent été observée concernant les phénomènes extrêmes.

II.2 Prélèvements en eau sur le territoire du SAGE

Cf. paragraphes II.2.2 et III.1 du rapport d'« Etat Initial » pour les informations sur :

- × les masses d'eaux souterraines,
- × les volumes prélevés et les usages,

- × l'origine de l'eau,
- × les pénuries d'eau.

Synthèse

- 3 principaux usages de l'eau :
 - ✓ AEP, 78 % des prélèvements en 2007, concerne tout le territoire,
 - ✓ activités industrielles, 19.5 % des prélèvements en 2007, concernent surtout les haute et moyenne vallées de l'Arve et du Giffre,
 - ✓ production de neige de culture, 12 % de prélèvements en 2007, concerne surtout les hauts bassins.
- Sur ces 3 types de prélèvements : 84 % en eau souterraine, 16 % en eau superficielle,
- 3 principaux réservoirs souterrains prélevés, dont 2 peuvent connaître des insuffisances d'alimentation de leurs exutoires en été et/ou hiver.
- Les prélèvements industriels se font surtout par le biais de puits et forages profonds, ceux destinés à l'AEP se font surtout dans des sources,
- Les retenues d'altitude ont a priori une bonne capacité d'adaptation à la variation de période de disponibilité de la ressource,
- Territoire globalement bien approvisionné pour l'AEP. Néanmoins, des pénuries pour certaines communes lors d'étés particulièrement secs et/ou d'hivers particulièrement froids.

II.3 Evolution potentielle des précipitations, de la température et des régimes hydrologiques dans le contexte d'un changement climatique

II.3.1 Gestion de l'incertitude

L'OCDE estime que le changement climatique pourrait modifier profondément le cycle hydrologique dans les Alpes (OCDE, 2007), c'est-à-dire la quantité et la distribution spatio-temporelle des précipitations, ainsi que le phénomène d'évaporation. Nous avons déjà mentionné les fortes incertitudes pesant sur les résultats des modélisations à échelle fine et des simulations des phénomènes hydrologiques moyens et extrêmes. Ce constat est d'autant plus valable dans les zones de montagne, où les hétérogénéités spatiales telles que le relief sont difficiles à prendre en compte et ont pourtant une influence sur les précipitations. Il importe de garder cette notion d'incertitude à l'esprit afin d'éviter les conclusions hâtives. Il est aussi nécessaire de surveiller l'évolution des résultats qui sera liée au perfectionnement des méthodes de modélisation. Néanmoins, l'incertitude ne doit pas être une raison pour ne pas agir ni décider. La gestion de l'incertitude peut être perçue comme une composante essentielle des processus de prévention et d'adaptation. Nous avons donc pris le parti de

réfléchir avec les informations disponibles à ce jour, en rappelant la précaution avec laquelle il convient de les utiliser.

II.3.2 Simulations d'évolution de la pluviométrie sur le territoire de l'Arve

A l'échelle globale, les modèles climatiques suggèrent généralement un accroissement des précipitations hivernales et une réduction des précipitations estivales pour les régions de moyenne latitude. A l'échelle des Alpes, les résultats des simulations régionales d'évolution des précipitations estivales et hivernales sont identiques. Concernant le territoire de l'Arve plus particulièrement, le simulateur climatique de l'ONERC illustre l'incertitude évoquée plus haut et reflète la grande variabilité des précipitations et la difficulté à distinguer une tendance significative. C'est notamment le cas pour les précipitations hivernales, qui présenteraient une légère augmentation (Figure 23), tandis que l'on constaterait une diminution nette des précipitations estivales, respectivement de l'ordre de 1 à 1,5 mm/jour pour les scénarios d'émissions B2 (modéré) et A2 (intensif), d'ici la fin du XXI^{ème} siècle (Figure 24). L'évolution simulée est la même pour les 3 mailles couvrant le périmètre d'étude. Elle ne reflète donc pas les fortes variations locales caractéristiques des zones de montagne. Par exemple, les versants exposés au vent devraient subir des précipitations beaucoup plus fortes que les versants situés sous le vent ou à l'intérieur d'un massif, qui seraient déficitaires (ONERC, 2008).

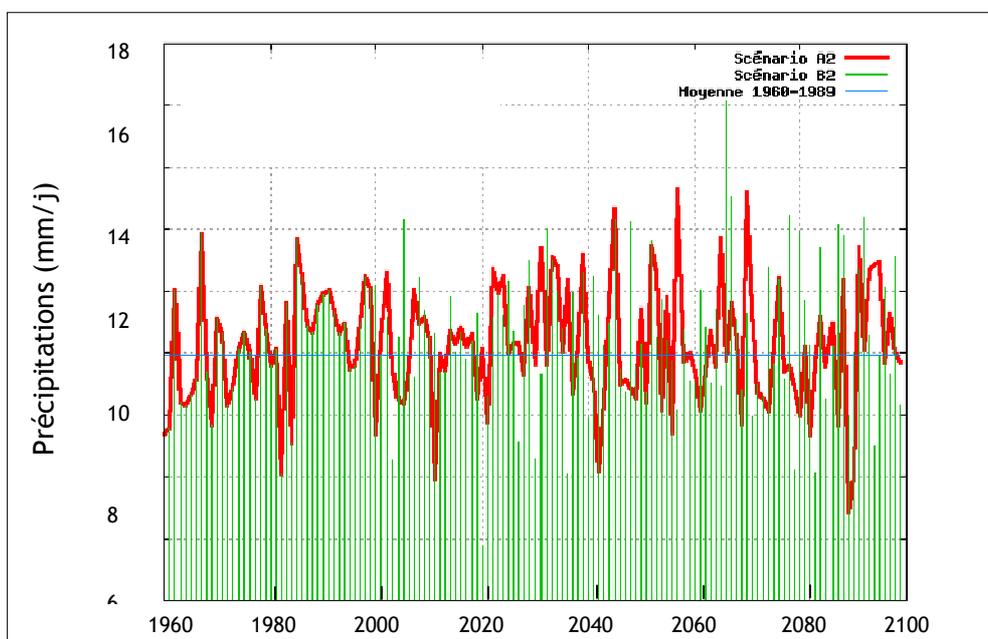


Figure 23 : Simulation d'évolution des précipitations hivernales moyennes pour les scénarios d'émissions A2 et B2

(Source : www.onerc.org)

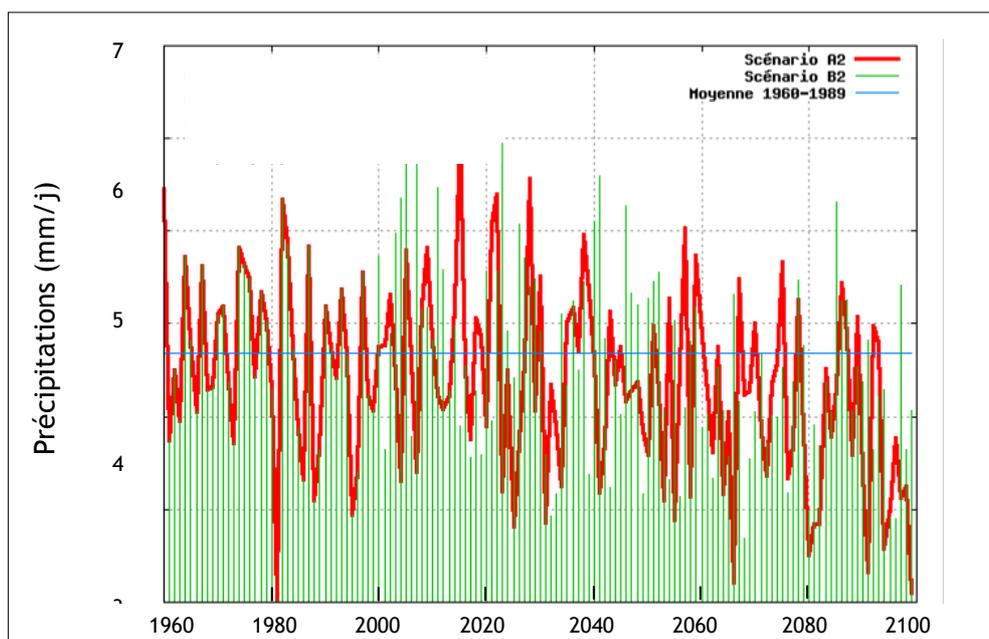


Figure 24 : Simulation d'évolution des précipitations estivales moyennes pour les scénarios d'émissions A2 et B2

(Source : www.onerc.org)

Il s'agit de valeurs simulées pour un périmètre de 50 km² autour du centre de maille dont les coordonnées sont 46.26°N, 6.46°E, 921 m d'altitude, c'est-à-dire pour la partie nord du périmètre d'étude.

II.3.3 Conséquences de l'évolution potentielle simultanée de la pluviométrie et de la température

Sous l'effet de la hausse des températures, le ratio précipitations solides / précipitations liquides pourrait être modifié. Une plus grande part des précipitations se présenterait sous forme liquide et la limite pluie/neige remonterait en altitude.

Une étude réalisée par P. Etchevers et E. Martin en 2002 a permis de simuler l'évolution du manteau neigeux dans le contexte d'une augmentation uniforme de la température de 1,8°C qui correspondrait, selon les projections globales du GIEC, à un doublement de la concentration atmosphérique en GES et aérosols aux environs de 2050-2070. Les résultats des simulations varient en fonction de l'altitude et du massif considérés. Pour les Alpes du Nord, l'impact d'une augmentation de la température serait marginal au-delà de 2 500 m d'altitude car les températures actuelles sont suffisamment basses. L'augmentation des précipitations hivernales simulée par de nombreux modèles pourrait même entraîner une augmentation de l'épaisseur de neige à ces altitudes, où la température serait encore assez basse pour permettre des précipitations solides. Cela n'aurait en revanche pas de réel impact sur la durée de l'enneigement car la fonte est plutôt gouvernée par la température. On pourrait ainsi observer une diminution de la durée d'enneigement d'une douzaine de jours en lien avec une

arrivée plus tardive des précipitations solides et une fonte légèrement plus rapide. L'impact d'une hausse de 1,8°C serait de plus en plus visible avec la diminution de l'altitude et deviendrait très important à 1 500 m, altitude à laquelle on pourrait passer de 5 à 4 mois de neige au sol par an (cette perte de 1 mois est valable pour l'ensemble des massifs) et d'environ 1 m à 60 cm d'épaisseur de neige dans les Alpes du Nord. D'autres chercheurs sont arrivés à des conclusions similaires. C'est notamment le cas du Suisse Martin Beniston, qui situe en revanche la limite altitudinale précipitations solides - précipitations liquides vers 2 000 m d'altitude (Beniston M., 2006).

Les impacts potentiels d'une augmentation de la température sur la quantité et la répartition des précipitations neigeuses, et donc sur l'épaisseur, l'extension et la durée de l'enneigement sont synthétisés dans la Figure 25, ainsi que le degré de confiance plus ou moins élevé qu'il est possible de leur accorder.

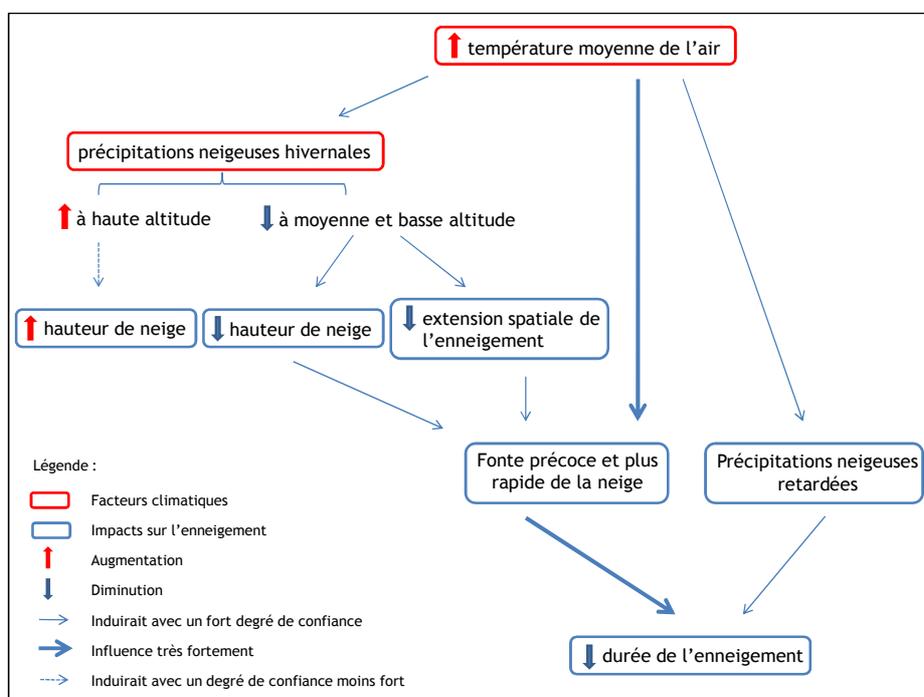


Figure 25 : Détail des impacts potentiels d'une augmentation de la température moyenne de l'air sur l'enneigement à haute, moyenne et basse altitudes

L'analyse de cette étude appliquée au territoire de l'Arve peut se faire au regard de deux données essentielles : la hausse de température moyenne de l'air de 1,8°C et la limite altitudinale de 1 500 m. Concernant l'altitude, un bon tiers des 34 domaines skiables du périmètre d'étude s'étend essentiellement sous 1 500 m. En outre, 24 stations sur 34 se situent également sous cette limite altitudinale. Concernant l'évolution des paramètres climatiques, rappelons que les simulations à haute résolution spatiale ont un degré de fiabilité moins important que les simulations à l'échelle globale. La régionalisation des tendances globales,

par exemple proposée par le simulateur climatique de l'ONERC, est néanmoins nécessaire pour mener une réflexion locale.

Le périmètre du SAGE s'étend ici sur 3 mailles du modèle ARPEGE-Climat de Météo-France. Les coordonnées des centres de chacune de ces 3 mailles sont les suivantes (Annexe 2) :

- × 46.26°N, 6.46°E, 921 m d'altitude. La grande ville la plus proche de ce point est Sciez, située au nord en marge du périmètre d'étude.
- × 46.05°N, 6.04°E, 634 m d'altitude. La grande ville la plus proche de ce point est Saint-Julien-en-Genevois, située à l'extrémité ouest du périmètre d'étude.
- × 45.70°N, 6.59°E, 1629 m d'altitude. La grande ville la plus proche de ce point est Ugine, située au sud-est en marge du périmètre d'étude.

Les valeurs des simulations pour l'ensemble des communes du périmètre d'étude sont obtenues par extrapolation de celles de ces 3 points.

Pour les 3 mailles concernées, les résultats des simulations suggèrent que la hausse de la température moyenne annuelle de l'air de 2°C sera atteinte aux alentours de 2060 pour un scénario modéré d'émissions et de 2020 pour un scénario intensif d'émissions (Figure 26). Si le scénario d'évolution de la température envisagé par P. Etchevers et E. Martin (2002) se réalise, les implications sur le territoire d'étude concerneraient donc, soit une large partie du XXI^{ème} siècle, soit plus particulièrement la seconde moitié du siècle, en fonction de l'évolution du rythme des émissions.

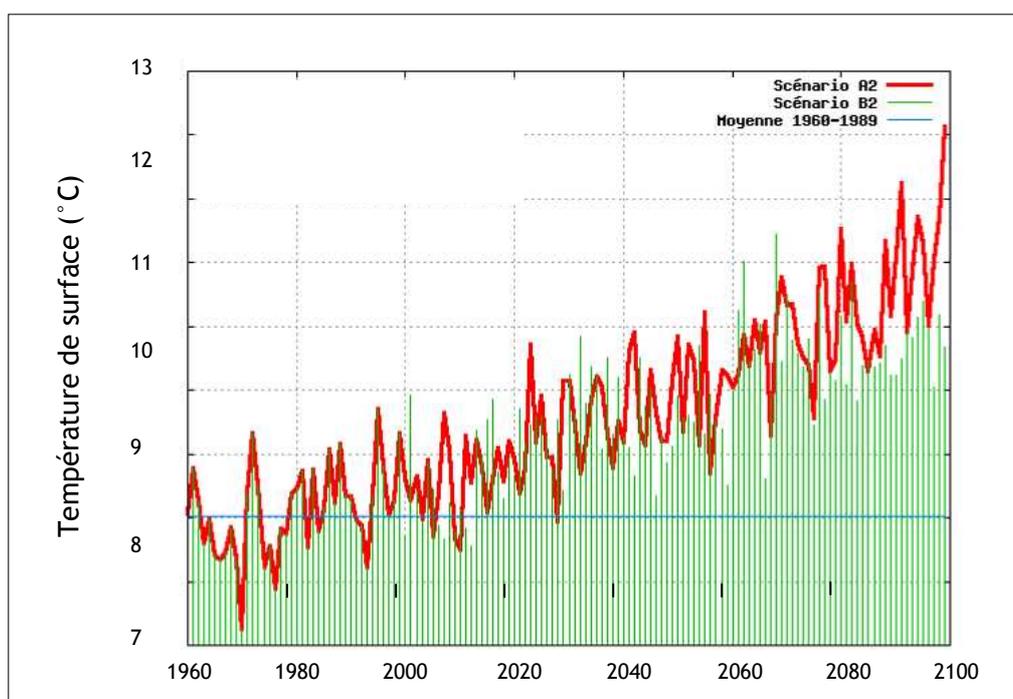


Figure 26 : Simulation d'évolution de la température moyenne annuelle de l'air pour les scénarios d'émissions A2 et B2

(Source : www.onerc.org)

La ligne bleue représente la moyenne simulée sur la période 1960-1989. Les hachures vertes correspondent aux simulations réalisées pour un scénario B2. La ligne rouge représente les simulations pour un scénario A2. Il s'agit de valeurs simulées pour un périmètre de 50 km² autour du centre de maille dont les coordonnées sont 46.26° N, 6.46° E, 921 m d'altitude, c'est-à-dire pour la partie nord du périmètre d'étude.

L'OCDE définit la notion d'enneigement naturel fiable, au regard de l'industrie du ski, comme une couverture naturelle de neige d'environ 30 à 50 cm présente pendant au moins 100 jours par saison (entre le 1^{er} décembre et le 15 avril)¹⁸. Notons que cela n'exempt pas nécessairement le domaine de neige de culture, puisque les 30 à 50 cm de neige ne sont pas répartis de façon homogène sur le domaine. La limite de l'enneigement naturel fiable est donc l'altitude en-dessous de laquelle ces conditions ne sont pas assurées. Dans les conditions climatiques actuelles, cette limite se situe aux environs de 1 200 m d'altitude dans le département de Haute-Savoie (OCDE, 2007). Selon les estimations, cette limite monterait de 150 m par degré Celsius supplémentaire. Pour un réchauffement de 2°C et de 4°C, cette limite pourrait donc passer respectivement à 1 500 et 1 800 m.

II.3.4 Etude de l'hydrologie des rivières de régimes nival et nivo-pluvial

Comme pour la question de l'enneigement, il est difficile de trouver des études locales portant sur le changement climatique et ses effets sur les régimes hydrologiques. De nouveau, l'étude de P. Etchevers et E. Martin (2002), dont la seconde partie porte sur l'hydrologie des bassins versants de montagne, tient lieu de référence. Ils se sont plus particulièrement intéressés au fonctionnement hydrologique des rivières à caractère nival et nivo-pluvial et ont effectué des simulations sur 3 cours d'eau de référence : l'Isère, la Haute-Durance et le Doubs. Aucune de ces rivières n'est située sur le territoire du SAGE. Cependant l'Isère est une rivière des Alpes du Nord et le Doubs présente un régime de type nivo-pluvial. Un rapprochement, certes prudent, peut donc être fait avec les cours d'eau du bassin intermédiaire de l'Arve et d'une partie du bassin aval, caractérisés par un régime nival ou nivo-pluvial.

L'étude s'appuie sur les résultats de 6 scénarios de doublement de CO₂ utilisés dans le cadre du projet GICC-Rhône¹⁹. Ces résultats simulent, selon les scénarios, un réchauffement de 1 à 2°C et jusqu'à 25 % d'augmentation des précipitations totales pour les mois de décembre à avril (les précipitations solides diminuant à cause de l'augmentation de température). Ces paramètres ont été intégrés à un modèle météorologique (SAFRAN) et un modèle hydrologique

¹⁸ La règle des 100 jours a été énoncée pour la première fois par U. Witmer dans son article « Erfassung, Bearbeitung und Kartierung von Schneedaten in der Schweiz ». *Geographica Bernensia* G25.

¹⁹ Projet du programme ministériel « Gestion et Impacts du Changement Climatique » et qui s'est déroulé de 1999 à 2004.

(MODCOU). En outre, s'agissant de cours d'eau à caractère nival, l'utilisation d'un module de neige simplifié a permis d'établir le lien entre l'évolution de la couverture neigeuse (en l'occurrence une réduction de l'épaisseur et de la durée de l'enneigement, au moins à basse et moyenne altitudes) et l'évolution des débits.

Les simulations suggèrent une augmentation des débits hivernaux en lien avec l'augmentation des précipitations liquides et un pic de fonte nivale qui intervient plus tôt. On pourrait constater en parallèle une réduction de l'amplitude des débits printaniers qui s'explique par une fourniture neigeuse moins importante l'hiver, et donc un pic de fonte moindre. En été, les différents scénarios s'accordent sur une réduction probable des débits du fait de l'augmentation de l'évaporation, de la diminution des précipitations et de la disparition totale de la neige et de son effet réservoir. Sur l'Isère, la réduction de débit la plus notable (environ - 50 %) se situe en juillet. Les rivières de type nival et nivo-pluvial perdraient donc leur caractère nival pour évoluer vers une influence totale des précipitations. Notons qu'à l'échelle de l'année les résultats sont peu significatifs puisque 3 scénarios simulent une augmentation des débits, tandis que les 3 autres projettent une diminution.

La Figure 27 synthétise ces résultats et met en évidence le lien entre le débit des cours d'eau et la disponibilité de la ressource. Cette figure part de l'hypothèse de l'augmentation de température induite par un doublement de la concentration atmosphérique en CO₂. Elle concerne les rivières à caractère nival, donc situées à moyenne altitude. C'est pourquoi l'augmentation potentielle des précipitations neigeuses à haute altitude n'est pas mentionnée.

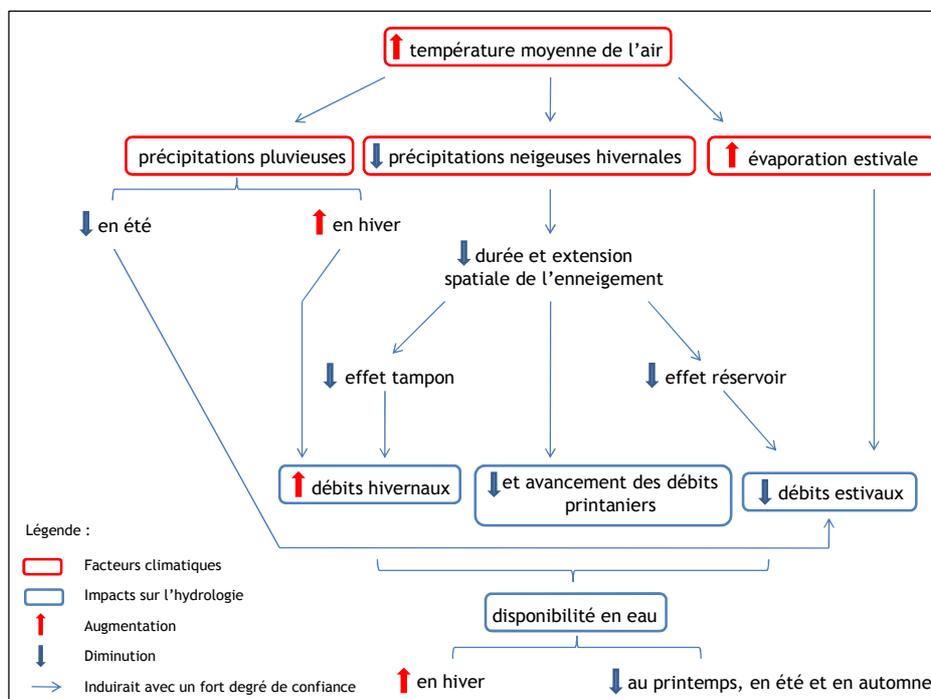


Figure 27 : Principaux impacts potentiels d'une augmentation de la température moyenne de l'air sur l'hydrologie des rivières de régime nival et disponibilité en eau associée

II.4 Disponibilité de la ressource en eau et satisfaction des principaux usages de l'eau

Les projections actuelles ne permettent pas de dire avec certitude si la ressource globale diminuera ou augmentera. C'est pourquoi l'analyse porte plus sur la variation des périodes de disponibilité de la ressource que sur la quantité totale d'eau disponible. Il est en outre juste possible d'identifier les difficultés d'approvisionnement que les différentes activités pourraient éventuellement rencontrer et non de se prononcer sur leur pérennité. La disponibilité de la ressource en eau peut aussi dépendre d'autres paramètres tels que l'occupation du sol, l'évolution des activités socio-économique, l'évolution des consommations, etc., que la présente analyse suppose inchangés.

L'évolution projetée des précipitations et des débits associés modifierait la répartition schématique des régimes hydrologiques de l'amont vers l'aval du territoire.

II.4.1 Evolution de la ressource en eau dans le bassin amont

Les eaux superficielles du bassin amont sont actuellement marquées par des régimes hydrologiques glaciaires. Dans le contexte d'un changement climatique tel qu'il est simulé sur le territoire, les rivières d'altitude alimentées par les glaciers pourraient voir leurs étiages hivernaux soutenus dans un premier temps par une fonte accrue des glaciers. Mais ce phénomène de compensation serait à long terme limité par la réduction, voire la disparition des glaciers. Les hautes eaux estivales seraient quant à elle moins fortes du fait de la fonte précoce et plus rapide de la neige, et de la diminution, à terme, de l'alimentation par fusion glaciaire. C'est notamment le cas pour les petits bassins englacés de faible altitude, pour lesquels la période de hautes eaux serait reportée sur le printemps. Pour les bassins situés à haute altitude, où la fonte des glaciers devrait être accrue mais moins rapide, les débits estivaux devraient rester élevés, voire augmenter pour les cours d'eau aux bassins d'alimentation de taille importante. Cette évolution suggère, pour les rivières de régime glaciaire et plus particulièrement celles de basse altitude, le passage à un régime nival, caractérisé par la même saisonnalité mais avec des débits moins marqués. C'est l'augmentation potentielle des précipitations solides à haute altitude qui permettrait le maintien d'une influence nivale.

Le bassin amont est en outre alimenté par le réservoir souterrain du domaine plissé du socle de l'Arve amont. La baisse hivernale du niveau de ce réservoir ne sera probablement pas compensée par l'augmentation des précipitations ni par l'accélération de la fusion glaciaire car, à haute altitude, il s'agira toujours de précipitations solides et que l'augmentation de la température ne sera probablement pas suffisante pour entraîner un dégel des sols et donc l'infiltration de l'eau. En outre, la hausse du niveau de la nappe pourrait être plus précoce

qu'actuellement. Les exutoires seraient donc bien alimentés au printemps, mais pourraient connaître des insuffisances estivales jusqu'à présent inexistantes.

II.4.2 Evolution de la ressource en eau dans le bassin intermédiaire et dans les parties hautes du bassin aval

Dans le contexte d'un réchauffement, les cours d'eau situés à moyenne altitude et actuellement caractérisés par un régime nival à nivo-pluvial seraient marqués par l'atténuation probable de leur caractère nival, au profit d'une influence accrue du régime des précipitations. La diminution probable des précipitations estivales et l'augmentation des précipitations hivernales auraient ainsi pour conséquence de faire basculer la période des basses eaux de l'hiver vers l'été, tandis que les hautes eaux se reporteraient sur l'hiver. On peut donc s'attendre à une inversion des périodes de disponibilité de la ressource superficielle.

La ressource souterraine est constituée des réservoirs des Bornes-Aravis et du Chablais-Faucigny et de leurs exutoires, situés à des altitudes moyennes, ainsi que des alluvions des vallées du Giffre et de l'Arve, dont l'évolution suit étroitement celle des deux rivières. A moyenne altitude, le niveau des nappes et donc le débit des sources associées pourraient augmenter en hiver, nouvelle période de hautes eaux marquée par une augmentation des précipitations et de leur capacité d'infiltration (le réchauffement climatique pourrait diminuer, voire supprimer le gel hivernal des sols). En revanche, les risques d'insuffisance estivale pourraient être accentués par la diminution attendue des précipitations.

II.4.3 Evolution de la ressource en eau dans les parties basses du bassin aval

Les régimes des cours d'eau y sont actuellement sous l'influence directe de la pluviométrie. Les tendances projetées d'évolution des précipitations donnent donc une idée de l'évolution potentielle des débits. Dans le contexte d'un changement climatique, le régime pluvial devrait être globalement accentué. En effet, l'augmentation des précipitations en hiver renforcerait les hautes eaux hivernales tandis que la diminution des précipitations estivales entraînerait des étiages estivaux plus marqués.

Les mêmes tendances pourraient être observées au niveau des réservoirs souterrains de cette zone, à savoir les formations variées de l'Avant-Pays savoyard et le domaine sédimentaire du Genevois.

II.4.4 Impacts quantitatifs potentiels sur les principaux usages socio-économiques de l'eau

En résumé, la ressource en eau du bassin amont devrait évoluer, à court et moyen terme, vers un lissage relatif de la disponibilité en eau au cours de l'année. Les prélèvements hivernaux pourraient néanmoins rester sujets à des insuffisances de la ressource, notamment en milieu souterrain. Cela pourrait poser problème pour l'alimentation en eau potable, qui prélève essentiellement dans des sources dont le comportement est proche de celui des eaux superficielles. Les prélèvements industriels, qui concernent surtout des puits et des forages, devraient connaître une moins grande vulnérabilité hivernale, car ces captages exploitent le réservoir à une profondeur importante, ce qui assure globalement leur alimentation, sauf en cas de surexploitation dudit réservoir. Enfin, le remplissage des retenues d'altitude, qui sont au nombre de 16 sur le territoire du SAGE en 2010 et qui alimentent près de la moitié des enneigeurs du territoire, serait favorisé au printemps, qui deviendrait la période de hautes eaux, dans les milieux superficiels comme souterrains.

Le bassin intermédiaire pourrait connaître une inversion des périodes de disponibilité en eau. Cette inversion serait particulièrement favorable aux prélèvements réalisés pour la production de neige de culture, notamment aux prélèvements hivernaux destinés à alimenter directement les enneigeurs. Le remplissage des retenues pourrait ne plus être garanti au printemps, mais leur fonction de stockage leur offre une certaine capacité d'adaptation et la persistance des variations interannuelles ne permet pas de généraliser. Il s'agirait aussi de repenser la gestion actuelle des prélèvements pour l'AEP et l'industrie, afin de s'adapter à la nouvelle distribution de la disponibilité de la ressource au cours de l'année. La sensibilité de certaines communes du bassin intermédiaire aux pénuries hivernales pour l'alimentation en eau potable pourrait être réduite, tandis que leur vulnérabilité au risque de pénurie estivale serait accrue.

Enfin, le bassin aval pourrait voir s'accroître les régimes hydrologiques actuels. Les prélèvements pour la production de neige de culture et les activités industrielles ne concernent pas directement cette partie du bassin. En outre, seules 2 communes ont déclaré une insuffisance d'approvisionnement pour l'AEP. Dans un contexte d'accentuation des tendances actuelles, il est toutefois possible que ces 2 communes connaissent des problèmes d'approvisionnement estivaux plus fréquents, ou que le nombre de communes sensibles au niveau quantitatif augmente.

II.4.5 Evolution possible de la demande

Le changement climatique pourrait avoir un impact indirect sur les prélèvements par le biais de l'évolution de la demande et donc des besoins en eau pour les différents usages socio-économiques.

Actuellement, l'alimentation en eau potable constitue l'usage de l'eau le plus important du territoire en termes de volumes de prélèvements (78 % du total en 2007). Or, le territoire est marqué par une croissance démographique soutenue (+ 1,25 %/an en moyenne ces dix dernières années). A ce rythme, on prévoit une augmentation de la population permanente du territoire de 30 000 personnes d'ici 2015 (on passerait de 330 000 à 360 000 habitants) (données SIDEAU, 2008). Une croissance similaire de la population touristique conduirait à près de 370 000 saisonniers d'ici 2015. La demande en eau potable risque donc de croître afin d'alimenter une population toujours plus importante. Les territoires les plus dynamiques, sont le Genevois, la moyenne vallée de l'Arve et le bassin Passy/Sallanches. Une amélioration, en parallèle, des rendements des réseaux d'adduction (Cf. paragraphes III.1.3 et VI.3 du rapport d'« Etat Initial ») ou encore le développement des pratiques d'économie d'eau pourraient néanmoins permettre de compenser cette augmentation attendue de la demande d'eau potable.

La part de la production de neige de culture dans les prélèvements en eau du territoire du SAGE est aujourd'hui globalement faible (2 % en 2007). Elle a cependant permis d'enneiger artificiellement 415 ha de domaine skiable pour la saison 2007/2008, soit près de 18 % du domaine skiable du territoire du SAGE. Bien que les prélèvements pour la production de neige représentent une faible part des prélèvements totaux tous usages confondus, des conflits d'usages peuvent apparaître, notamment au niveau local. Dans le contexte d'un réchauffement climatique, l'enneigement naturel pourrait fortement diminuer aux moyennes et basses altitudes. Cette diminution pourrait faire augmenter la demande de neige de culture et donc le besoin en eau pour cet usage. Cependant, les conditions climatiques de production de neige pourraient aussi devenir pénalisantes, notamment à basse altitude, ce qui pourrait contrer la hausse attendue de la production. En effet, la production de neige de culture n'est possible qu'à partir de - 2°C secs, pour une humidité relative de l'air de 100 %. Cette température hivernale pourrait être de plus en plus rarement atteinte à partir de 2030 selon le simulateur climatique de l'ONERC. Néanmoins, les systèmes d'enneigement à haute pression sont plus productifs avec une température sèche de l'air plus élevée que les systèmes à basse pression. Or, les systèmes à haute pression représentent plus de 80 % des enneigeurs du territoire d'étude. Le parc actuel d'enneigeurs serait, à ce titre, plutôt bien adapté à une hausse de la température. En outre, les stations situées à moyenne et basse altitudes se trouvent plutôt dans le bassin intermédiaire, donc dans une zone où la disponibilité de l'eau en hiver pourrait augmenter. Néanmoins, les prélèvements dans les réseaux d'AEP sont la plus importante source

d'alimentation des retenues d'altitude et servent également à l'alimentation directe d'une part des enneigeurs. L'évolution de la demande en eau potable sera donc, avec l'évolution des conditions de température, un élément déterminant pour la production de neige de culture, d'autant que l'usage eau potable est prioritaire.

Concernant l'activité industrielle, aucune tendance ne se dessine à priori, il est donc difficile d'évaluer la manière dont elle pourrait évoluer dans le contexte d'un changement climatique.

II.5 Synthèse sur les impacts potentiels du changement climatique sur la ressource en eau

- Evolution possible de certains facteurs de contrôle de la ressource en eau :
 - ✓ Légère augmentation des précipitations hivernales ; diminution de 1 à 1,5 mm/jour des précipitations estivales,
 - ✓ Fonte accrue des glaciers,
 - ✓ Diminution de l'enneigement naturel,
 - ✓ Perte du caractère nival des cours d'eau sous influence actuelle de la neige.
- Conséquences sur les régimes hydrologiques :
 - ✓ Lissage, à terme, des débits dans le bassin amont : basses eaux hivernales moins fortes, hautes eaux printanières, débits estivaux moindres,
 - ✓ Inversion des débits dans le bassin intermédiaire : basculement des hautes eaux de l'été vers l'hiver et des basses eaux de l'hiver vers l'été,
 - ✓ Accentuation des débits dans le bassin aval : hautes eaux hivernales plus fortes, basses eaux estivales plus marquées.
- Autres tendances probables en lien avec la ressource en eau :
 - ✓ Augmentation de la population et donc de la demande en AEP,
 - ✓ Augmentation de la demande en eau pour la production de neige de culture là où la production sera toujours possible.

II.6 Eléments de réflexion pour approfondir l'analyse

L'universitaire T. Campion (2002) s'est intéressé à la question de l'impact quantitatif de la production de neige de culture sur la ressource en eau en montagne. Afin de quantifier cet impact, il définit le paramètre P/R, qui est le rapport entre les prélèvements effectués pour la production et la ressource en eau disponible au mois de janvier, identifié comme le mois le plus pénalisant. Il a calculé ce rapport pour les départements montagnards français. Notons qu'il ne prend pas en compte les stations alimentant leurs enneigeurs par le biais du réseau

d'AEP, dont les prélèvements sont difficiles à quantifier, et qu'il part de débits d'étiage extrapolés et de l'estimation moyenne de 200 h de fonctionnement des enneigeurs pour le seul mois de janvier. Il obtient un ratio P/R variant entre 0 et 25 % pour le mois de janvier pour la dizaine de stations du territoire de l'Arve étudiées. S'agissant du mois le plus critique, on peut considérer que ce rapport est plutôt faible. L'auteur constate en outre que ce ratio est plus élevé pour les stations ne disposant pas de retenue d'altitude, ce qui est le cas d'une quinzaine de domaines sur le territoire d'étude. Dans le contexte d'un changement climatique, la pression exercée par cet usage sur la ressource en eau pourrait être renforcée ou allégée, selon la tendance qui prendra le dessus entre augmentation probable de la demande en neige de culture pour pallier à la diminution de l'enneigement naturel et augmentation possible de la disponibilité en eau en hiver, pour les stations de moyenne et basse altitude du bassin intermédiaire.

La demande en eau pourrait globalement augmenter sur le territoire de l'Arve dans le contexte d'un changement climatique. Il est difficile de savoir si la disponibilité de la ressource suivra la même tendance. L'émergence de conflits d'usages n'est donc pas à écarter si la quantité totale d'eau disponible s'avère insuffisante pour satisfaire l'ensemble des usages. Dans son ouvrage consacré aux mesures d'adaptation et coûts associés, l'ONERC propose un certain nombre de pistes de réflexion sur les mesures à mettre en œuvre pour répondre à ces évolutions (ONERC, 2008). Il s'agit par exemple de la définition de priorités dans les usages et de la redéfinition des débits réservés, qui pourraient permettre d'assurer une gestion de la ressource adaptée à l'évolution de l'offre et de la demande. Une réflexion sur le stockage de la ressource pourrait aussi être menée afin d'assurer une meilleure maîtrise de la saisonnalité de la disponibilité de l'eau. L'ONERC évoque enfin la nécessité d'adopter des stratégies de gestion des ressources assez souples pour prendre en compte l'ensemble des scénarios d'évolution possible et les incertitudes attachées à ces scénarios. Mais notons que la question de l'adaptation à l'évolution de la ressource hydrique est surtout traitée au niveau national jusqu'à présent. Aucune étude n'est actuellement disponible au niveau alpin.

III Démarches engagées pour l'adaptation au changement climatique à l'échelle des Alpes

Les chercheurs et les gestionnaires s'accordent à dire que les clefs de l'adaptation sont au niveau local. Selon l'ANEM, l'approche vallée par vallée, et par département, et donc la coopération intercommunale, semblent plus pertinentes concernant le changement climatique que le découpage administratif, qui ne permet pas toujours de mobiliser l'ensemble des moyens adéquats.

Le projet européen AdaptAlp (Adaptation to climate Change in the Alpine space) a été lancé en septembre 2008 afin de poursuivre les réflexions engagées sur la base des recommandations issues de ClimChalp (2006-2008), afin d'élaborer la base de stratégies transnationales d'adaptation dans les domaines des régimes hydrologiques et de la cartographie, de la prévention et de la gestion des risques naturels. Le projet devrait s'achever en août 2011.

L'un des principaux axes de réflexion est l'harmonisation de la terminologie, des approches et des méthodes nationales, afin d'initier des actions d'adaptation efficaces sur des sites pilotes.

Les recommandations de l'ANEM (2007) constituent des pistes de réflexion variées et adaptées au contexte montagnard, sur lesquelles s'appuie le Plan d'action changement climatique dans les Alpes, adopté lors de la Xème Conférence alpine, en mars 2009. Ce plan d'actions, qui une fois encore prend plutôt la forme d'orientations et de pistes de réflexion que d'actions concrètes et planifiées, comporte un volet présentant des mesures d'atténuation du changement climatique, et un volet sur les mesures d'adaptation. Parmi les axes d'intervention à privilégier sur la thématique de l'eau et des ressources hydriques :

- * Les mesures permettant de renforcer la mise en œuvre de la DCE,
- * Les mesures de prévention des pénuries d'eau (réduction de la consommation et amélioration de l'utilisation de l'eau),
- * Les mesures de contrôle du développement des centrales hydroélectriques.

Plus globalement, le plan d'actions promeut le développement de la recherche appliquée à l'échelle du massif alpin, notamment dans les domaines des risques naturels (en s'appuyant sur PLANALP, une plate-forme dédiée aux risques naturels mise en place en novembre 2004) et des impacts socio-économiques, et l'amélioration de la sensibilisation du public.

Conclusion

L'analyse de l'évolution de la ressource en eau sur le territoire de l'Arve, à partir de projections plus ou moins locales selon l'état d'avancement des recherches, a permis de mettre en évidence certaines pistes de réflexion qui pourraient être intégrées au futur SAGE Arve.

Le phénomène de changement climatique se traduirait par une modification du régime des précipitations. Sur le territoire de l'Arve, on peut s'attendre à une diminution probable des précipitations neigeuses et une augmentation des précipitations pluvieuses en hiver, et une diminution des précipitations pluvieuses estivales. L'évolution associée des régimes hydrologiques et de l'alimentation des aquifères pourrait modifier la quantité d'eau disponible sur le territoire ainsi que la période de disponibilité de la ressource, avec des répercussions possibles sur les volumes d'eau prélevés afin de satisfaire les usages de l'eau du territoire.

L'échelle du SAGE constitue une échelle d'analyse pertinente (par exemple pour la gestion des volumes d'eau prélevés), entre le régional et le local, et à laquelle les acteurs peuvent agir concrètement. Les pistes de réflexion proposées devront donc faire l'objet d'un travail de concertation afin de déterminer la manière dont elles pourront être intégrées au futur SAGE.

Cette étude a d'une part mis en évidence la nécessaire amélioration des projections locales, afin de pouvoir mener des études d'impacts reflétant la réalité des territoires. Elle a d'autre part fait ressortir le besoin accru de connaissance des phénomènes afin de poursuivre l'analyse. Au niveau local, cela passe par un meilleur suivi de certains paramètres clefs dans l'évolution du système climatique. Il s'agit donc de s'interroger sur l'adaptation des réseaux actuels à l'observation du changement climatique et de réaliser une mise à niveau éventuelle afin de renforcer le recueil de données. Par exemple, les réseaux de mesure des précipitations dans les zones de montagne ne semblent actuellement pas suffisants. En parallèle, la création d'un réseau d'observatoires physiques, économiques et sociaux du changement climatique et de ses impacts à l'échelle du territoire de l'Arve, afin d'exploiter les données récoltées, permettrait de répondre à ce besoin croissant de connaissance. Il s'agit de l'une des recommandations fortes de l'ANEM (Annexe 1, proposition n°20). Dans ce cadre, des échanges constants entre chercheurs et gestionnaires doivent être favorisés.

La thématique du changement climatique implique en outre des aspects financiers et réglementaires qui n'ont pas été abordés dans le présent rapport mais devront être pris en compte ultérieurement (cf. les travaux récents de l'OCDE (OCDE, 2008), de l'Agence Européenne pour l'Environnement (EEA, 2007) et de l'ONERC (ONERC, 2008 et 2009)).

Enfin, le changement climatique n'est qu'un aspect d'un changement global qui s'effectue actuellement à l'échelle planétaire et se traduit notamment par des modifications majeures dans l'occupation des sols, les systèmes agricoles, la consommation énergétique, etc. Une étude complémentaire pourrait donc être proposée afin de poursuivre l'étude des impacts potentiels d'un changement climatique, en intégrant l'ensemble des politiques sectorielles. Cette étude pourrait en outre réfléchir de manière plus approfondie aux stratégies d'adaptation à mettre en œuvre en fonction des évolutions observées et évaluer l'efficacité des mesures actuelles dans le contexte d'un changement climatique. Ce document de synthèse exhaustif sur la question, outil d'aide à la décision, offrirait au territoire de l'Arve la possibilité de devenir un territoire pilote sur la question de l'adaptation au changement climatique et de la gestion de l'incertitude.

Bibliographie

ANEM - 2007 - Au-delà du changement climatique, les défis de l'avenir de la montagne. Rapport au 23ème congrès. 102 p.

Beniston M. - 2006 - Mountain weather and climate: a general overview and a focus on climatic change in the Alps. In *Hydrobiologia* : 562. 13 p.

Campion T. - 2002 - Etude de l'impact de la production de neige de culture sur la ressource en eau, en hiver, en montagne. Mémoire de Mastère, stage réalisé à l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée Corse. 68 p.

ClimChAlp - 2008a - Changement climatique, impacts et stratégies d'adaptation dans l'Espace Alpin. Common Strategic Paper. Allemagne. 32 p.

ClimChAlp - 2008b - Changement climatiques dans les Alpes : Impacts et risques naturels. Rapport technique n°1 de l'ONERC. Paris. 100 p.

EEA - 2007 - Climate change: the cost of inaction and the cost of adaptation. EEA Technical report (No 13/2007). 67 p.

Etchevers P., Martin E. - 2002 - Impact d'un changement climatique sur le manteau neigeux et l'hydrologie des bassins versants de montagne. Colloque international « L'eau en montagne » - Megève, septembre 2002. 8 p.

GIEC - 2000 - Rapport Spécial du Groupe de travail III du GIEC sur les scénarios d'émissions. Résumé à l'intention des décideurs. Sous la direction de Nakicenovic N. et Swart R. IPCC Secrétariat, Genève. 27 p.

GIEC - 2007a - Bilan 2007 des changements climatiques : Rapport de synthèse. Contribution au 4ème rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Résumé à l'intention des décideurs. 37 p.

GIEC - 2007b - Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au 4ème rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. France. Résumé à l'intention des décideurs. 22 p.

GIEC - 2007c - Bilan 2007 des changements climatiques : Les bases scientifiques physiques. Contribution du Groupe de travail I au 4ème rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Chapitre 11 : Projections climatiques régionales. 94 p.

GIEC - 2007d - Bilan 2007 des changements climatiques : Impacts, adaptation et vulnérabilité. Contribution du Groupe de travail II au 4ème rapport d'évaluation du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat. Résumé à l'intention des décideurs. 20 p.

GIEC - 2008 - Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Sous la direction de Bates B.C., Kundzewicz Z.W., Wu S. et. Palutikof J.F. IPCC Secrétariat, Genève. 210 p.

Giret A. - 2007 - Géographie de l'écoulement fluvial. Editions L'Harmattan. Paris. 354 p.

Livre Blanc ESCRIME - 2006 - Etude des Simulations Climatiques Réalisées par l'IPSL et Météo-France. Edité par CERFACS et IPSL/LSCE. 70 p.

Loubier J.C. - 2004 - Perception et simulation des effets du changement climatique sur l'économie du ski et la biodiversité (Savoie et Haute-Savoie). Thèse de doctorat. 246 p.

Mainguy, J. - 1990 - Analyse des potentialités climatiques pour l'enneigement artificiel. Actes du Congrès International « La production de neige artificielle, entre développement touristique et environnement naturel » tenu à Trente (Italie) les 4, 5 et 6 avril 1990. 10 p.

OCDE - 2007 - Changements climatiques dans les Alpes européennes : Adapter le tourisme d'hiver et la gestion des risques naturels. Sous la direction de Shardul Agrawala. Paris, les éditions de l'OCDE. 136 p.

OCDE - 2008 - Aspects économiques de l'adaptation au changement climatique : coûts, bénéfices et instruments économiques. Sous la direction de Agrawala S. et Fankhauser S. Les éditions de l'OCDE. Paris. 157 p.

OCDE - 2009 - The Economics of Climate Change Mitigation: How to Build the Necessary Global Action in a Cost-effective Manner. Economics Department Working Papers No. 701. Sous la direction de Burniaux J.M. et al. Les éditions de l'OCDE. Paris. 122 p.

ODIT France - 2008 - Les domaines skiables face aux aléas d'enneigement et le développement de la neige de culture. Eléments de prospective. Dossier ODIT France. 13 p.

ONERC - 2007 - Stratégie nationale d'adaptation au changement climatique. La Documentation française. Paris. 97 p.

ONERC - 2008 - Impacts du changement climatique, adaptation et coûts associés en France. Document d'étape. 389 p.

SEATM - 1996 - Neige de culture : guide d'aide à la décision. Les dossiers du SEATM. 118 p.

SM3A - 2009 - Dossier préliminaire d'établissement du SAGE Arve. Syndicat Mixte d'Aménagement de l'Arve et de ses Abords. 100 p.

WEBOGRAPHIE

<http://cdiac.ornl.gov/pns/convert.html>, consulté en août 2009.

<http://onerc.org/presentationScenario.jsf>, consulté en mai 2009.

http://www.cccsn.ca/Help_and_Contact/Regional_Climate_Models-f.html, consulté en mai 2009.

http://www.cccsn.ca/Help_and_Contact/Spatial_Downscaling-f.html, consulté en mai 2009.

<http://www.cidce.org/pdf/motion%20GIZC%20CIDCE.pdf>, consulté en août 2009.

<http://www.cnrm.meteo.fr/gmgec/>, consulté en mai 2009.

http://www.cnrm.meteo.fr/present/le_cnrm.htm, consulté en avril 2009.

<http://www.ecologie.gouv.fr>, consulté en avril 2009.

<http://www.ecologie.gouv.fr/HYDRO-banque-nationale-de-donnees.html>, consulté en août 2009.

<http://www.ecologie.gouv.fr/-ONERC-.html>, consulté en mars et avril 2009.

http://www.ec.gc.ca/Science/sandemar02/article1_f.html, consulté en mai 2009.

<http://www.interreg-atlantique.org/iiiib/presentation/index.html>, consulté en mars et avril 2009.

http://www.ipcc.ch/home_languages_main_french.htm, consulté en mars et avril 2009.

<http://www-old.cemagref.fr/Informations/Recherch/eed/aleas-amenag.htm>, consulté en août 2009.

<http://www.onerc.org/viewChooseScenarioForFirstTime.jsf>, consulté d'avril à juillet 2009.

http://www.xpair.com/cours_gefen.php?CGcat=&pint_typ=6&pint_ArtId=85&pint_coursId=26, consulté en juin 2009.

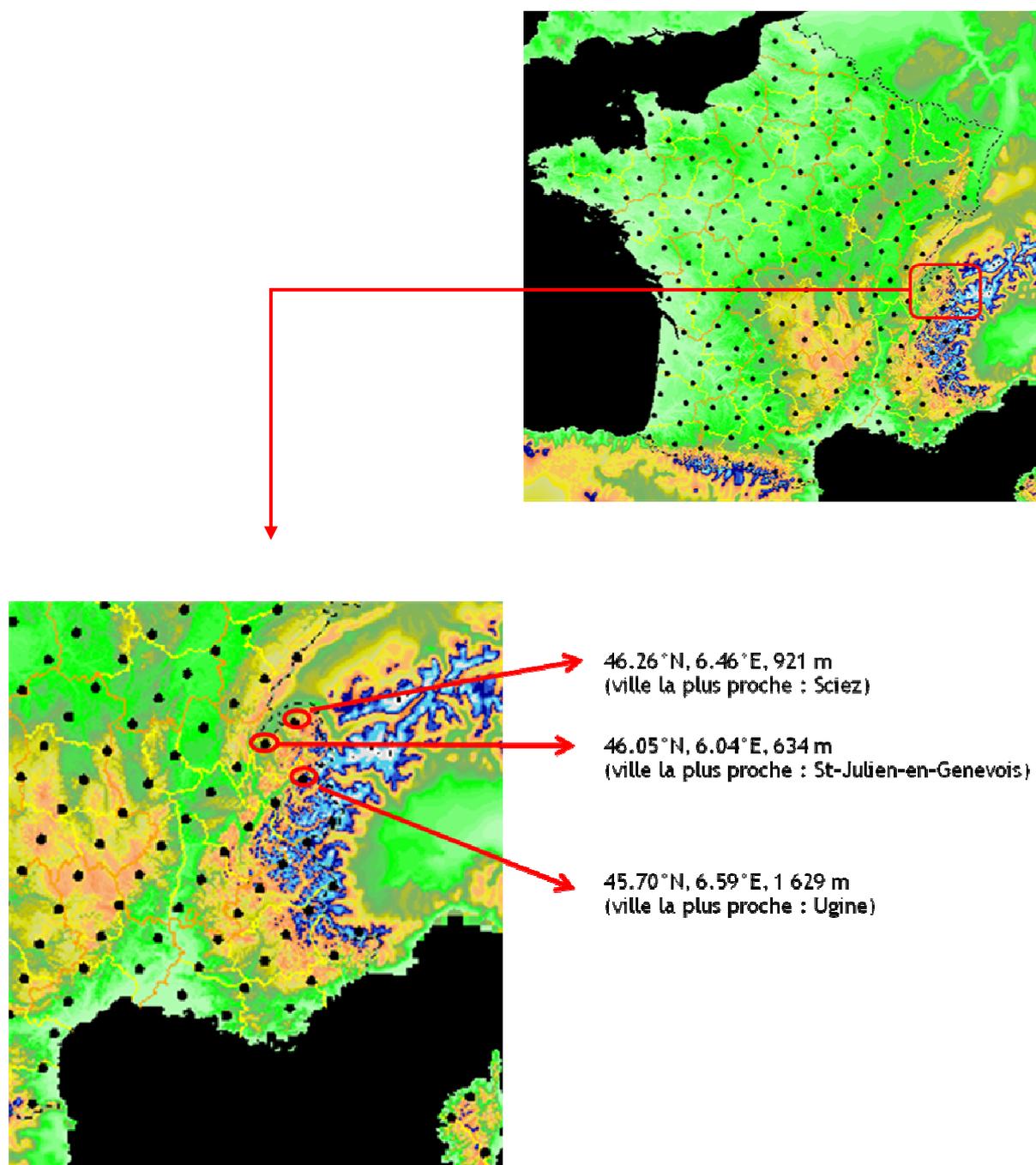
Annexes

Annexe 1 : Propositions d'adaptation effectuées par l'ANEM lors de son 23^{ème} congrès

(Source : ANEM, 2007)

- N° 1 : Créer une dotation spécifique aux territoires à haute valeur environnementale au sein de la DGF
- N° 2 : Soutenir les missions environnementales de l'agriculture
- N° 3 : Entretien des alpages par le soutien au pastoralisme et gérer la ressource en eau, en altitude
- N° 4 : Valoriser les productions agricoles en protégeant les labels et les appellations d'origine
- N° 5 : Dynamiser la filière bois en montagne avec de nouveaux débouchés
- N° 6 : Soutenir les collectivités de montagne qui souhaitent investir dans la production d'énergie à partir de biomasse
- N° 7 : Promouvoir l'approche territoriale de l'offre touristique
- N° 8 : Requalifier l'immobilier touristique et l'adapter au changement climatique
- N° 9 : Soutenir les mutations du secteur hôtelier
- N° 10 : Renouveler les formes d'accueil en montagne
- N° 11 : Agir globalement sur l'habitat des populations permanentes
- N° 12 : Développer les transports en commun pour les déplacements locaux et touristiques
- N° 13 : Mettre en place une veille active sur les risques naturels
- N° 14 : Préserver la ressource en eau
- N° 15 : Relancer la recherche sur les essences sylvicoles pour maintenir l'exploitation forestière en montagne
- N° 16 : Diversifier l'offre touristique hivernale
- N° 17 : Créer un Fonds Neige
- N° 18 : Améliorer la visibilité et l'accessibilité de l'offre de montagne
- N° 19 : Donner des fondations solides à l'attractivité de la montagne
- N° 20 : Créer un observatoire du changement climatique en montagne
- N° 21 : Créer un Fonds européen d'adaptation aux effets du changement climatique en montagne

Annexe 2 : Carte des 210 mailles formant la grille du simulateur de l'ONERC et des 3 mailles couvrant le territoire de l'Arve

(Source : www.onerc.org)

Le périmètre d'étude s'étend ici sur 3 mailles. Les valeurs des simulations pour l'ensemble des communes du périmètre sont obtenues par extrapolation de celles de ces 3 centres de maille.

Annexe 3 : Liste des 34 domaines skiables du territoire de l'Arve

NOM DE LA COMMUNE	NOM DU DOMAINE	ALTITUDE DE LA STATION (en m)	EXTENSION ALTITUDINALE DU DOMAINE (en m)
ARACHES	Les Carroz	1 140	1 140 - 2 500
	Flaine	1 600	1 600 - 2 500
BELLEVAUX	Hirmentaz	1 100	900 - 1 800
BOGEVE, ONNION, ST-JEOIRE, VIUZ	Les Brasses	980	900 - 1 600
CHAMONIX	Le Tour	1 450	1 450 - 2 270
	Les Grands Montets	1 970	1 235 - 3 300
	Brévent	1 800	1 030 - 2 525
	Flégère	1 900	1 900 - 2 450
	Planards	1 000	1 060 - 1 240
	Les Bossons	1 030	
	Le Savoy	1 050	1 050
COMBLOUX	Combloux	1 180	1 000 - 1 850
LES CONTAMINES-MONTJOIE	Les Contamines-Montjoie	1 170	1 150 - 2 500
CORDON	Cordon	1 100	1 000 - 1 600
LES GETS	Les Gets	1 170	1 170 - 2 000
LE GRAND-BORNAND	Le Grand-Bornand	1 300	1 000 - 2 100
HABERE-POCHE, HABERE-LULLIN	Les Habères	950	900 - 1 600
LES HOUCHES	Les Houches	1 000	950 - 1 900
MIEUSSY	Sommand	1 400	1 200 - 2 000
MONT-SAXONNEX	Mont-Saxonnex	1 100	1 100 - 1 570
MORILLON	Les Esserts	1 300	700 - 2 500
NANCY-SUR-CLUSES	Romme	1 010	

Rapport annexe sur le changement climatique : état des connaissances et analyse contextuelle de la sensibilité du tourisme d'hiver et de la ressource en eau sur le périmètre du SAGE

PASSY	Plaine Joux	1 010	1 000 - 1 680
LE REPOSOIR	Le Reposoir	980	
SAMOËNS	Les Saix	1 600	720 - 2 500
SAINT-GERVAIS	Prarion	1 850	
	Bettex	1 400	
	Mont d'Arbois	1 850	
	Mont-Joux	1 630	1 400 - 2 350
SAINT-SIXT	Orange	1 060	
SIXT	Piste des Cascades	840	800 - 1 600
	Salvagny	840	
TANINGES	Praz-de-Lys	1 500	1 450 - 2 000
VALLORCINE	Balme	1 260	1 260 - 2 270

Cette liste a été élaborée à partir de données portant sur la saison 2007-2008 de la DDAF 74 et du cabinet ODIT France. L'extension altitudinale des domaines ainsi que l'altitude de certaines stations ont été obtenus en consultant les sites Internet desdites stations. Les cases grisées indiquent que l'information n'a pu être trouvée.