

**Coup de projecteur  
sur le climat suisse**  
Etat des lieux et perspectives

**Editrice**

Académies suisse des sciences  
Maison des Académies  
Laupenstrasse 7, Case postale, 3001 Berne  
[www.academies-suisses.ch](http://www.academies-suisses.ch)

**Un projet de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)**

ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux  
+41 31 306 93 50, [proclim@scnat.ch](mailto:proclim@scnat.ch), [www.proclim.ch](http://www.proclim.ch)

**Conseil d'experts scientifiques**

Comité directeur de ProClim

avec le soutien  
de l'organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC)  
et de l'office fédéral de l'environnement (OFEV)

**Rédaction**

Martina Mittler, Sanja Hosi

**Collaboration rédactionnelle**

Hannah Ambühl, Sarah Arnold, Pascal Blanc, Linus Cadotsch, Michael Herger,  
Anne Jacob, Martin Kohli, Christoph Kull, Gabriele Müller-Ferch, Urs Neu,  
Christoph Ritz, Rina Wiedmer, Karin Ammon

**Lectorat**

Muriel Thalmann

**Traduction**

Jean-Jacques Daetwyler, Sciencepress  
Zieltext AG

**Conception graphique**

Olivia Zwygart

**Couverture/Photomontages**

Ruth Schürmann (archive OFEV, Matthias Hust, archive privée)

**Impression**

Vögel AG, Langnau i. E.

3<sup>e</sup> tirage, 2017 (en ligne)

Le rapport peut être commandé gratuitement auprès de ProClim ou

sous [www.academies-suisses.ch/publications](http://www.academies-suisses.ch/publications)

© Académies suisses des sciences, 2016

Proposition de citation:

Académies suisses des sciences (2016)

Coup de projecteur sur le climat suisse. Etat des lieux et perspectives.

Swiss Academies Reports 11 (5)

Rapport et matériel supplémentaire disponibles sous  
[www.proclim.ch/coupdeprojecteur](http://www.proclim.ch/coupdeprojecteur)

ISSN (print) 2297-1564

ISSN (online) 2297-1572

sc | nat 

Swiss Academy of Sciences  
Akademie der Naturwissenschaften  
Accademia di scienze naturali  
Académie des sciences naturelles

Swiss Climate  
**CO<sub>2</sub> neutre**  
Impression  
SC2012073001 • [www.swissclimate.ch](http://www.swissclimate.ch)



Ce rapport est climatiquement neutre et a été imprimé selon  
le principe innovatif Cradle to Cradle™ de Vögel AG à Langnau.  
Seuls des matériaux sans risque pour le circuit biologique ainsi  
que pour l'homme et la nature ont été utilisés.

# Incidences et risques

## Infrastructures

▲ La Suisse est-elle prête à affronter des événements climatiques plus extrêmes ? Les hôpitaux, les services de sauvetage et de protection de la population pourraient être davantage mis à contribution à l'avenir. (Chap. 2.12)

▲ Une société largement indépendante des énergies fossiles nécessitera des infrastructures différentes (réseau routier, aéroports, réseaux électriques). Les investissements d'aujourd'hui pourraient se révéler non rentables demain et menacer des emplois. (Chap. 2.12)

▲ Les infrastructures installées sur du pergélisol, comme des remontées mécaniques et des paravalanches, pourraient être déstabilisées par le réchauffement. (Chap. 2.3/2.11)



## Villes et localités

▲ Le phénomène d'îlot de chaleur est particulièrement marqué en ville durant les étés caniculaires. Il s'agit d'un problème majeur lié au changement climatique. Durant les canicules de 2003 et 2015, les fortes chaleurs ont été dans les deux cas à l'origine de près de 1000 décès prématuress en Suisse. (Chap. 2.12/2.13/2.15)

▲ Les localités et les bâtiments seront de plus en plus menacés par les inondations. La plupart des villes sont bâties à proximité de cours d'eau ou de lacs. (Chap. 2.4/2.12/2.13)

▲ Grâce à des hivers plus doux, les besoins en chauffage vont encore diminuer. Cela permettra de réaliser des économies d'énergie, malheureusement en partie contrebalancées par un besoin accru de climatisation en été. (Chap. 3.1)



## Champs et forêts

▲ L'épicéa risque de disparaître du Plateau suisse. Il est également menacé dans les forêts protectrices des régions de montagne, à des altitudes de plus en plus élevées. Cet arbre, le plus important de l'industrie forestière suisse, est sensible à la sécheresse et vulnérable à la prolifération du bostryche. (Chap. 2.9)

▲ Le réchauffement sera problématique pour les cultures telles que le blé d'hiver ou la pomme de terre. Le maïs et la vigne, en revanche, se porteront mieux pour autant qu'ils reçoivent suffisamment d'eau. (Chap. 2.10)

▲ Les ravageurs comme le carpocapse (ver des pommes et poires), compteront à l'avenir deux à trois générations par an, au lieu d'une ou deux aujourd'hui. (Chap. 2.10)



## Ressources hydriques

▲ Les pénuries d'eau pendant les mois d'été vont augmenter la concurrence entre tous les utilisateurs. Elles concerneront particulièrement les agriculteurs, dont les besoins en irrigation vont s'accroître. (Chap. 1.8/2.4/2.10/2.11)

▲ La réduction des réservoirs naturels que sont les glaciers et la neige va accroître la nécessité de stocker l'eau dans les lacs artificiels pour faire face à l'ensemble de la demande. (Chap. 2.4/2.11)

- ▲ Incidences et risques
- ★ Atténuation
- Adaptation



Dans la région alpine, le réchauffement a été environ deux fois plus fort qu'en moyenne mondiale. Toute la Suisse est touchée directement et indirectement par les conséquences du changement climatique :



#### Lacs et cours d'eau

- ▲ La baisse de la pluviométrie estivale et la diminution des eaux de fonte de la neige et de la glace engendreront une nette réduction des débits en été. (Chap. 1.7/2.4)
- ▲ Les précipitations hivernales se produiront de plus en plus souvent sous forme de pluie, avec une incidence directe sur les débits, qui devraient légèrement augmenter en hiver. (Chap. 1.7/2.4)
- ▲ La hausse des températures et de l'altitude de l'enneigement prolongeront la saison des inondations en parallèle avec une augmentation des débits maxima due à l'intensification des précipitations. (Chap. 1.8/2.4)



#### Animaux et végétation

- ▲ Avec l'augmentation des températures et de la sécheresse, un grand nombre de plantes, insectes, oiseaux et autres animaux vont migrer en altitude, avec un risque de concurrence accrue entre espèces. (Chap. 2.7)
- ▲ Certaines espèces se déplaceront trop lentement par rapport à la vitesse du changement climatique ou se trouvent dans des zones n'offrant aucune échappatoire vers des habitats plus favorables. (Chap. 2.8)
- ▲ Le rythme saisonnier de la faune et de la flore va se modifier jusqu'à perturber l'interaction entre les espèces. Certains insectes vont par exemple manquer une période de floraison déterminante. (Chap. 2.8)



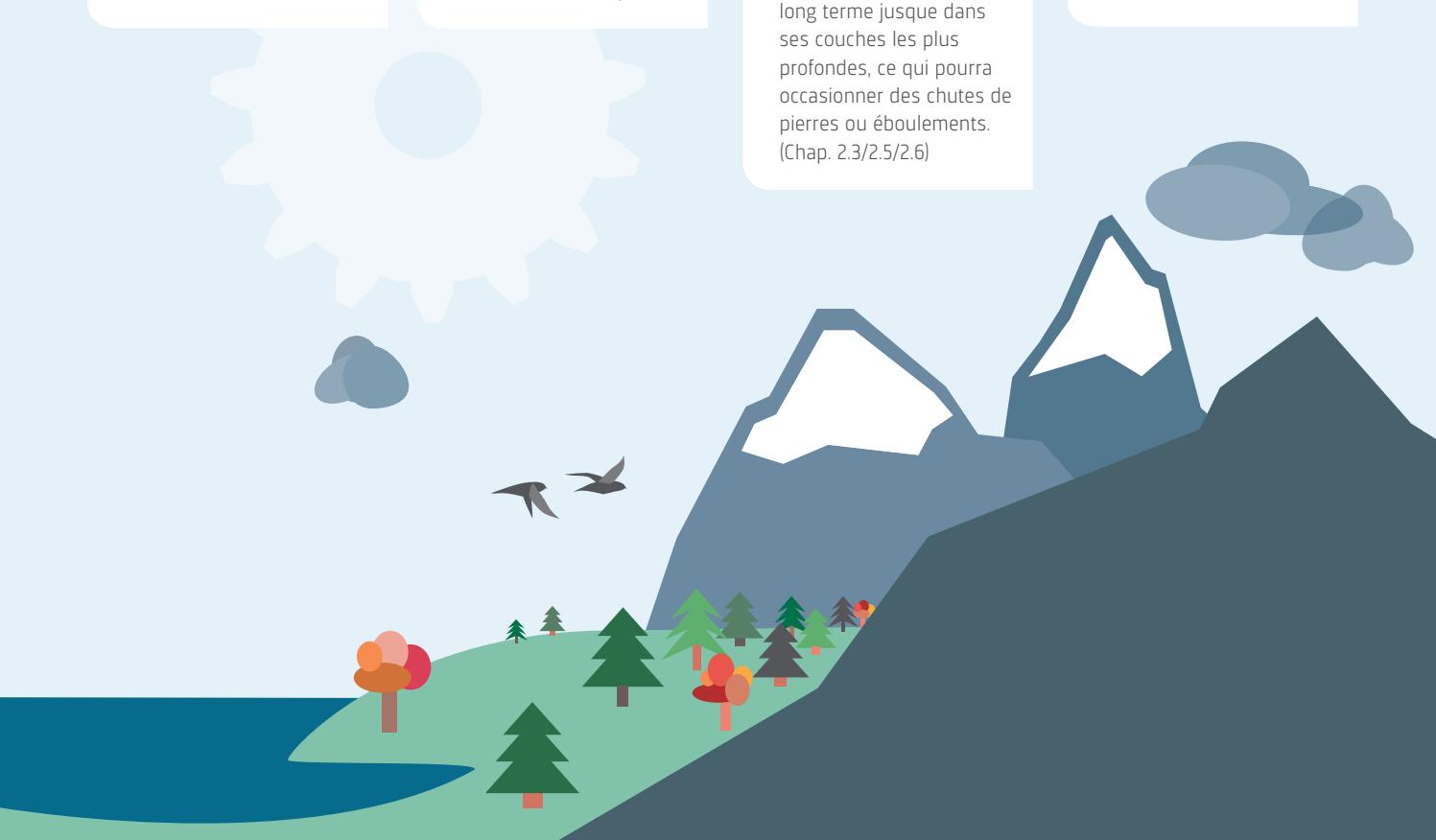
#### Montagnes, neige et glace

- ▲ Les glaciers suisses fondent. Une grande partie d'entre eux aura probablement disparu à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle. (Chap. 1.9/2.3/2.14)
- ▲ En haute montagne, les paysages seront de plus en plus faits de rochers, d'éboulis et de végétation éparses ainsi que de nombreux petits lacs. Ces lacs accroîtront le potentiel de risques naturels, mais offriront aussi de nouvelles opportunités. (Chap. 2.3/2.5)
- ▲ La saison de la neige va encore se raccourcir de plusieurs semaines et la limite pluie-neige s'élèver de plusieurs centaines de mètres. (Chap. 2.3/2.11)
- ▲ Le pergélisol de haute montagne va fondre à long terme jusque dans ses couches les plus profondes, ce qui pourra occasionner des chutes de pierres ou éboulements. (Chap. 2.3/2.5/2.6)



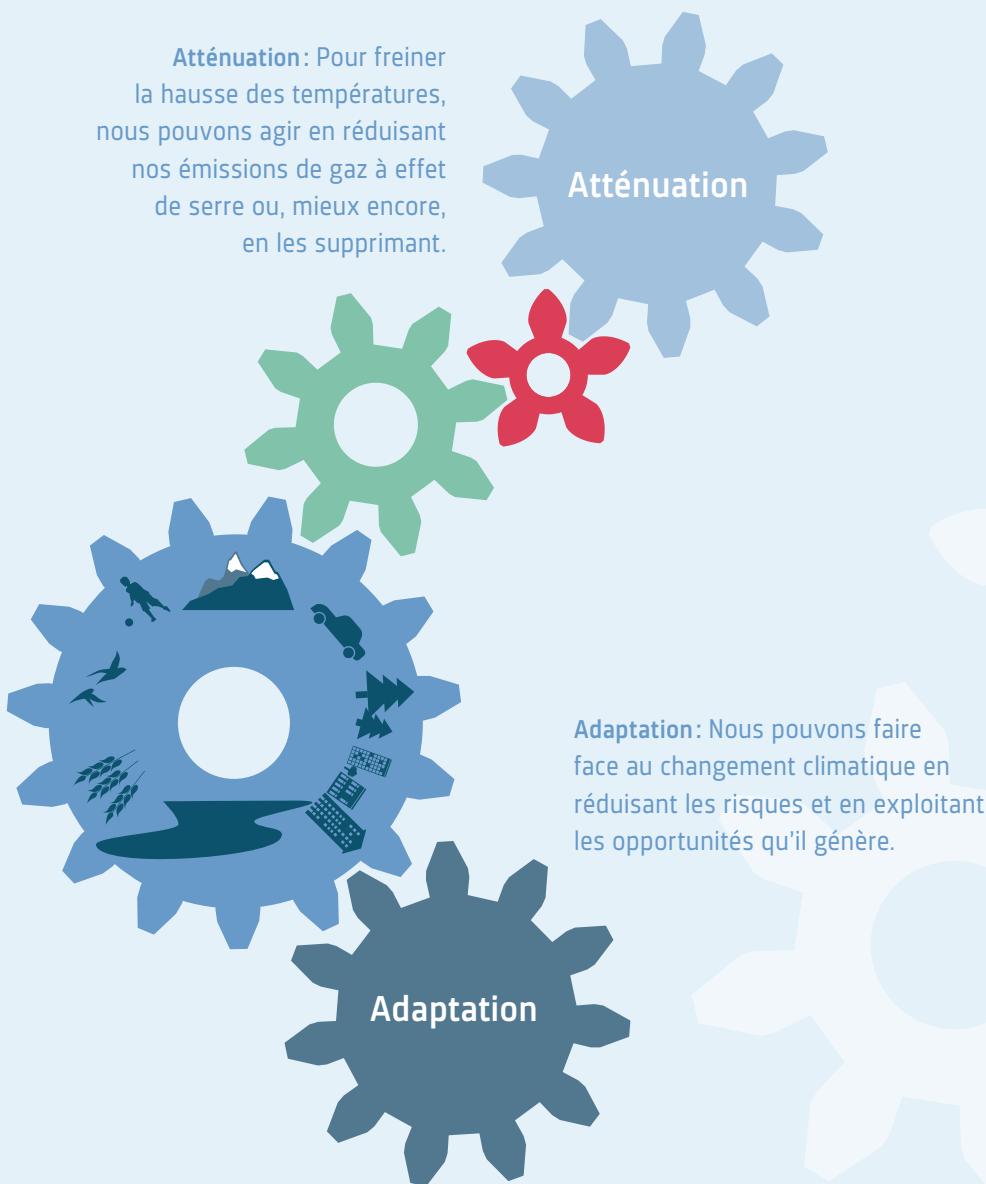
#### Phénomènes météorologiques extrêmes

- ▲ Canicules: en été, on observe déjà une augmentation de la fréquence et de l'intensité des périodes caniculaires ainsi que des records de chaleur. Ce phénomène va s'intensifier à l'avenir. (Chap. 1.8)
- ▲ Précipitations: on devrait assister à une hausse de la fréquence et de l'intensité des précipitations extrêmes, ainsi que des inondations, coulées de boue, glissements de terrain et laves torrentielles. (Chap. 1.8/2.4)
- ▲ Le risque de sécheresse augmente: au total, les prévisions pour l'été annoncent un recul du nombre de jours de pluie ainsi qu'un allongement des périodes de sécheresse. (Chap. 1.8)



# Champs d'action

Pour limiter le réchauffement de la planète à moins de deux degrés Celsius comme la communauté internationale l'a convenu, il faudrait réduire très rapidement les émissions de gaz à effet de serre. A moyen terme, le bilan émissions/absorption devra être nul. Il est possible d'atténuer les conséquences du changement climatique, d'exploiter certaines opportunités et de mettre en place une société et une économie respectueuses du climat.



## Déplacements et voyages

- ★ Réduire les trajets professionnels: les moyens de télécommunication modernes permettent le télétravail et la visioconférence. (Chap. 3.4)
- ★ Le vélo et la marche à pied permettent de réduire les transports motorisés tout en améliorant sa santé. (Chap. 2.15/3.8)
- ★ Aménagement urbain et du territoire: des villes plus compactes où l'habitat, les commerces, le travail et les loisirs sont proches, permettent de réduire les déplacements. (Chap. 3.8)
- ★ Des vols en avions moins fréquents pour des séjours plus longs, ou des vacances en Suisse, réduisent non seulement les émissions de gaz à effet de serre mais aussi le stress et le temps passé dans les transports. (Chap. 3.5)
- ★ Lors de l'achat d'une voiture, opter pour un véhicule sobre, du format et de la puissance effectivement nécessaires, c'est faire le choix de l'efficacité énergétique. (Chap. 3.5)



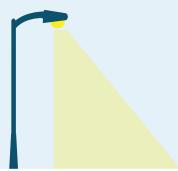


## Habitat et chauffage

● Les parcs, les arbres et les plans d'eau réduisent l'effet d'îlot de chaleur et contribuent à la qualité de vie en ville. (Chap. 3.8)

★ Une bonne isolation des bâtiments réduit les besoins en chauffage en hiver ainsi que la chaleur excédentaire en été. Mais les constructions doivent aussi répondre à des nécessités d'aménagement. Il s'agit par exemple de favoriser la circulation de l'air entre les bâtiments pour faire baisser la température en cas de canicule. (Chap. 3.4/3.8)

★ Les installations solaires thermiques, les pompes à chaleur, le couplage chaleur-force ou le chauffage à distance peuvent remplacer le mazout et le gaz. (Chap. 3.4)



## Utilisation de l'énergie

★ Les réglementations relatives aux émissions de CO<sub>2</sub> et à la consommation d'énergie et l'intégration des coûts externes peuvent encourager l'approvisionnement et l'utilisation d'énergies neutres en CO<sub>2</sub>. (Chap. 3.4)

★ Les étiquettes énergétiques sur les produits ou les bâtiments encouragent les ménages à investir dans des appareils et installations énergétiquement efficaces. (Chap. 3.3)

★ Les changements de comportement peuvent réduire la demande énergétique, par la modération de la consommation en général, ou en intégrant de nouvelles habitudes, comme p. ex. celle d'éteindre complètement les appareils électriques et électroniques après utilisation. (Chap. 3.3)

★ L'énergie économisée à un endroit est souvent consommée ailleurs. Par exemple, on réduit sa facture d'énergie avec un chauffage plus efficace, mais avec les économies réalisées, on s'offre un voyage en avion. En prenant pleinement conscience de ce type de mécanisme, on peut veiller à les éviter. (Chap. 3.3)



## Boire et manger

● Gérer parcimonieusement les ressources en eau pour les cultures et lutter contre le gaspillage: les sols travaillés avec soin nécessitent moins d'eau et les cultures hivernales telles que le colza ou l'orge d'hiver en consomment moins. Les projets de systèmes d'irrigation à faibles pertes se multiplient dans les régions centrale et occidentale du Plateau suisse. (Chap. 2.10)

★ Nous pouvons toutes et tous limiter notre consommation globale, éviter le gaspillage de nourriture, manger moins de viande et réduire ainsi facilement nos émissions de CO<sub>2</sub>. (Chap. 2.10)



## Santé

● Apprendre les bons gestes en cas de fortes chaleurs: boire en quantité suffisante, éviter l'exposition au soleil et rétablir l'équilibre physiologique en eau et sel après l'effort. (Chap. 2.15)

● S'informer sur la propagation de maladies, p. ex. sur les moyens de se prémunir contre des moustiques transmettant de nouvelles maladies en Suisse, ou sur les nouvelles zones colonisées par les tiques. (Chap. 2.15)



## Engagement politique

★ S'engager pour une politique climatique efficace et contribuer à façonner le monde de demain. (Chap. 4)





# **Coup de projecteur sur le climat suisse**

## **Etat des lieux et perspectives**

# Contenu

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Editorial</b>   | <b>11</b> |
| <b>Synthèse</b>  | <b>13</b> |
| <b>Partie 1: Fondements scientifiques</b>  | <b>21</b> |
| <b>Explications préliminaires</b>  | <b>22</b> |
| Pourquoi a-t-on besoin de scénarios climatiques ?  | 23        |
| Les phénomènes de crues «impensables» dans la pratique et en sciences  | 28        |
| 1.1 Introduction   | 28        |
| 1.2 Le climat du passé   | 32        |
| 1.3 La variabilité climatique: les fluctuations à court terme du climat  | 34        |
| 1.4 Les modèles climatiques  | 36        |
| 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre   | 38        |
| 1.6 La température   | 40        |
| 1.7 Le cycle hydrologique  | 46        |
| 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques  | 52        |
| 1.9 Les océans et la cryosphère  | 60        |
| <b>Partie 2: Incidence et adaptation</b>   | <b>69</b> |
| Défis pour la recherche, la pratique et la société en lien avec<br>les risques naturels causés par le climat – étude de cas à Haslital (canton de Berne) | 70        |
| 2.1 Introduction   | 74        |
| 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC   | 77        |
| 2.3 Neige, glaciers et pergélisol  | 80        |
| 2.4 Eau  | 84        |
| 2.5 Dynamique des paysages et habitats polaires et alpins<br>de haute altitude   | 88        |
| 2.6 Dangers naturels provoqués par des changements du système climatique:<br>chaînes de processus et risques complexes                                   | 92        |
| 2.7 Ecosystèmes alpins   | 96        |
| 2.8 La biodiversité et les services écosystémiques   | 100       |
| 2.9 La forêt   | 106       |
| 2.10 L'agriculture   | 111       |
| 2.11 Tourisme  | 117       |
| 2.12 Bâtiments et infrastructures  | 121       |
| 2.13 L'espace urbain   | 126       |
| 2.14 Conséquences des changements climatiques sur le système énergétique suisse  | 129       |
| 2.15 Santé   | 132       |
| 2.16 La migration dans le réseau d'interdépendances globales   | 136       |
| 2.17 L'industrie de l'assurance et des services financiers   | 139       |
| 2.18 Stratégies et mesures de la Confédération en matière d'adaptation aux changements<br>climatiques  | 144       |

|  |            |
|--|------------|
| <b>Partie 3: Atténuation</b>   | <b>149</b> |
| La décarbonisation – transformation vers la compatibilité climatique                   | 150        |
| 3.1 Introduction   | 154        |
| 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain                        | 156        |
| 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement                              | 164        |
| 3.4 Energie  | 168        |
| 3.5 Transports   | 174        |
| 3.6 Aspects techniques   | 178        |
| 3.7 Agriculture, foresterie et autres affectations des terres                          | 181        |
| 3.8 Stratégies urbaines face au changement climatique                                  | 186        |
| <b>Partie 4: Politique climatique</b>  | <b>191</b> |
| 4.1 Introduction   | 192        |
| 4.2 La politique climatique suisse   | 194        |
| 4.3 Naissance et développement d'une politique climatique                              | 198        |
| 4.4 Politiques climatiques dans le monde:<br>Enseignements tirés de leur mise en œuvre | 202        |
| 4.5 La coopération internationale  | 205        |
| Expertes et experts  | 210        |
| Référencement GIEC   | 211        |

## Editorial



Au niveau mondial, 2015 a été de loin l'année la plus chaude depuis que l'on a commencé à relever les températures aux environs de 1880. C'est aussi en 2015 que l'on a enregistré en Suisse les températures annuelles moyennes les plus hautes depuis 1864. De même, chacune des cinq dernières décennies a été plus chaude que la précédente. Le changement climatique ne se manifeste non seulement dans des séries de données, mais de plus en plus aussi dans les écosystèmes du monde entier. Il a en outre des impacts sur les sociétés. La communauté internationale de recherche a réuni les résultats des travaux actuels dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Ces faits révèlent de façon impressionnante à quel point notre environnement s'est déjà transformé en raison de l'évolution du climat; ils indiquent également quelles réductions des émissions sont requises pour maintenir les effets prévisibles à un niveau aussi faible que possible – des effets qui seront surtout négatifs à long terme pour la plupart des sociétés.

A l'initiative de l'OcCC et de ProClim, de nombreux spécialistes de la communauté scientifique suisse ont regroupé dans ce dossier les éléments significatifs pour la Suisse du dernier Rapport d'évaluation du GIEC et les ont complétés par d'autres résultats de recherche importants pour le pays ou en relation avec lui. Ces faits parlent un langage clair: la Suisse ne sera pas épargnée par le changement climatique.

Avec l'issue positive des négociations de Paris sur le climat, menées en décembre 2015 sous le patronage de l'ONU, une première étape importante a été franchie au niveau international pour faire face aux défis qui se présentent. L'objectif consistant à limiter le réchauffement planétaire à moins de deux degrés Celsius et à restreindre même l'augmentation de la température à 1,5 degrés Celsius au maximum implique de réduire les émissions de façon massive et continue; finalement, il faudra aussi renoncer totalement à la combustion d'agents énergétiques fossiles. Mais que signifient ces objectifs pour la société, l'économie et la politique? A cet égard, les scientifiques continueront d'être appelés à communiquer de façon claire et compréhensible et à fournir des réponses dans tous les domaines. Une chose est sûre: de grands efforts sont nécessaires pour atteindre ces objectifs – également en Suisse.

L'objectif national de la Suisse, visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre de 50 pour cent (30 pour cent à l'intérieur des frontières, 20 pour cent à l'étranger) jusqu'en 2030 par rapport à 1990, est un premier pas. Une prochaine étape sera de tendre à des émissions nulles pendant la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle. Ceci implique une transformation fondamentale de la société et de l'économie.

Tous les investissements à long cycle et les grands projets d'infrastructures doivent aujourd'hui déjà faire l'objet d'un examen critique dès le stade de la planification quant à leur compatibilité climatique. Pour maîtriser ce changement, il faut faire entrer l'aspect du climat dans le traitement de presque toutes les questions relevant de la société, de l'économie et de la politique. Une majorité en faveur des mesures nécessaires doit se former à tous les niveaux politiques. Il faut en outre faire prendre conscience de l'urgence de cette problématique.

ProClim et l'OcCC remercient la communauté suisse de recherche d'avoir regroupé les faits importants et mis en évidence l'urgence de la question ainsi que de possibles approches pour la réduction drastique des émissions et l'adaptation au changement climatique. Les scientifiques appellent les différents acteurs à tous les échelons politiques à s'atteler résolument à la mise en place des mesures requises, en ayant à l'esprit la promotion de l'intérêt général.

*Dr Kathy Riklin (OcCC), Conseillère nationale  
Prof. Dr Heinz Gutscher (ProClim)*



## Synthèse





Des observations et les résultats de la recherche mettent en évidence, clairement et sans ambiguïté, les changements que le climat a subis jusqu'ici, les conséquences qui se manifestent déjà distinctement et la direction dans laquelle cette évolution se poursuit. Les problèmes liés au changement climatique sont largement identifiés et des approches de solution existent. Il est possible de déduire des recommandations concrètes pour la Suisse (voir les recommandations stratégiques 2015 de l'OcCC en matière de politique climatique). Les impacts augmenteront pendant les prochaines décennies et placeront la société et l'économie devant de grands défis :

- Depuis le début des mesures systématiques (1864) jusqu'à aujourd'hui (2016), la température moyenne a augmenté en Suisse d'environ 1,8 degrés Celsius (cf. chap. 1.6 La température, p. 40), et d'à peu près 0,85 degrés Celsius au niveau mondial. Les principales causes du réchauffement sont le recours aux agents énergétiques fossiles, la production de ciment et des changements de l'utilisation du sol (par exemple la déforestation) ainsi que les émissions connexes de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre. Du fait que les émissions de gaz à effet de serre continuent actuellement d'augmenter, le changement climatique anthropique se poursuivra. Les transformations qu'il entraîne persisteront pendant des siècles, de même que les modifications climatiques elles-mêmes.
- La poursuite du réchauffement soumet les écosystèmes et la société à des risques croissants. Les mesures d'adaptation ne limitent que partiellement ces dangers et deviennent de surcroît de plus en plus coûteuses.
- Les plus grands défis du changement climatique pour la Suisse sont, d'une part, des extrêmes tels que les vagues de chaleur, les sécheresses ou les fortes précipitations, ainsi que l'avènement de dangers naturels en rapport avec ces événements. Ce sont aussi, d'autre part, les lentes transformations – en partie irréversibles – des paysages et des écosystèmes, tels que la fonte des glaciers ou des changements relatifs à la biodiversité, à la qualité de l'eau et à l'incidence des ravageurs et des maladies.
- Ces changements ont des impacts directs sur la société (par exemple sur la santé) et sur l'économie (par exemple sur le tourisme) et occasionnent des coûts déjà aujourd'hui. Les risques, de même que les efforts financiers nécessaires pour prévenir et minimiser les dommages, augmenteront avec l'intensification du changement climatique, en raison des transformations qui en découlent.
- La Suisse est fortement insérée dans le tissu économique international. De ce fait, elle sera touchée aussi par des effets indirects du climat au niveau mondial, par exemple en matière de commerce extérieur ou par des conséquences de la migration.
- La question qui se pose n'est donc pas de savoir si le changement climatique aura des impacts sur la Suisse, mais comment ces effets se manifesteront localement et quels risques et coûts ils entraîneront pour des secteurs et des branches spécifiques. La compréhension des effets locaux est la clé d'une adaptation efficace en termes de coûts et coordonnée tant au niveau territorial que technique. Une vue macroéconomique détaillée des charges actuelles et de celles attendues dans le futur est nécessaire pour fixer l'ordre de priorité des mesures à prendre.



Lors de la XXI<sup>e</sup> conférence sur le climat, qui a eu lieu en 2015 à Paris, un accord juridiquement contraignant pour tous les Etats a été adopté à l'échelon politique international ; il vise à limiter l'augmentation mondiale des températures à nettement moins de deux degrés Celsius et à restreindre les effets du changement climatique. Ceci implique la réduction systématique et draconienne des émissions de gaz à effet de serre dans tous les processus et activités qui se déroulent dans notre société. Pour limiter les effets existants et à venir, des solutions appropriées en matière d'atténuation et d'adaptation sont nécessaires de toute urgence :

- Actuellement, le changement climatique évolue le long d'une trajectoire d'émissions qui – si rien n'est corrigé – l'entraînera bien au-dessus de la limite de réchauffement convenue.
- Toute stabilisation de la température – indépendamment du réchauffement maximal visé – ne peut réussir que si les émissions nettes de CO<sub>2</sub> sont finalement réduites à zéro au niveau mondial. Par conséquent, les agents énergétiques fossiles devront être complètement remplacés dans tous les secteurs (électricité, transports, industrie, infrastructures et bâtiments) ; une grande partie des réserves énergétiques fossiles existantes ne devront donc pas même être exploitées comme combustible. Pour pouvoir encore atteindre les objectifs climatiques, un renversement de tendance doit se produire dans les plus brefs délais en matière d'émissions mondiales.
- La participation de tous les Etats aux efforts d'atténuation et d'adaptation est essentielle pour résoudre le problème du climat mondial. Certes, peu de nations portent jusqu'ici, de par le volume de leurs émissions, la responsabilité principale pour l'augmentation de la concentration de gaz à effet de serre ; mais en définitive, chaque Etat peut et doit apporter sa contribution à l'amélioration de la situation, réduire et finalement faire cesser ses émissions de CO<sub>2</sub>.
- Etant donné que les pays les plus fortement touchés par les conséquences du changement climatique n'ont pas les ressources pour mettre en œuvre un développement à faible intensité de carbone, ils ont besoin de l'aide des pays industrialisés.
- Ne pas agir aujourd'hui réduit la marge de manœuvre et entraînera ultérieurement des coûts plus élevés tant en matière d'adaptation que d'atténuation. Des étapes de réduction toujours plus ambitieuses seront nécessaires pour atteindre encore l'objectif visé. Si les mesures prises ne suffisent pas, le réchauffement dépassera largement l'objectif fixé en matière de température.

Alors que l'élaboration et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation impliquent des efforts avant tout aux échelons national et international, la réalisation de mesures d'adaptation requiert l'engagement et la collaboration des acteurs au niveau local, en Suisse aussi.



Une politique climatique suisse ambitieuse, qui respecte les objectifs convenus au niveau international, engage la société et l'économie du pays sur une voie durable et porteuse d'avenir :

- Une mutation vers une gestion durable de l'environnement sera indispensable tant au niveau international que national; la politique climatique joue un rôle clé dans ce contexte. La Suisse bénéficie d'excellentes conditions intellectuelles, économiques et techniques ainsi que des structures étatiques appropriées pour s'investir avec succès dans cette transformation et avancer dans cette voie. Elle peut en outre renforcer son engagement en prenant le parti de mesures efficaces dans des négociations internationales, par exemple celles de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) ou du droit commercial de l'Organisation mondiale du commerce (OMC).
- Les entreprises, produits et techniques suisses sont la cause d'émissions de gaz à effet de serre, mais peuvent aussi contribuer à les atténuer à l'étranger, par exemple par des transferts technologiques ou en exportant des techniques à faibles émissions. Les entreprises suisses sont appelées à inclure le changement climatique dans leurs stratégies à long terme. Des mesures d'atténuation et d'adaptation en Suisse et à l'étranger peuvent présenter un intérêt économique croissant pour notre pays et susciter le développement et la commercialisation de nouvelles techniques d'avenir.
- Pour exploiter à temps les chances qui s'offrent à elle en la matière, la Suisse doit rester innovante et en réseau avec le monde. Elle peut ainsi agir de manière prévoyante dans l'intérêt d'un développement économique mondial durable en même temps que de sa propre prospérité.



Le défi du changement climatique doit être considéré dans son contexte avec d'autres défis auxquels la société, l'économie et l'environnement sont confrontés. En agissant avec prudence et en intégrant les différentes perspectives, il est possible de maîtriser les problèmes actuels, bien qu'ils tendent à s'accentuer. Les sociétés qui vivent aujourd'hui préserveront ainsi leur base existentielle et légueront un environnement aussi intact que possible, qui assurera une marge de manœuvre aux générations futures sans qu'elles aient à assumer de lourdes charges héritées de notre légèreté présente :

- En 2015, quelque 7,3 milliards d'êtres humains vivaient sur la Terre. Ce nombre passera probablement à environ 9,3 milliards d'ici 2050 et peut-être à plus de 10 milliards jusqu'en 2100. La croissance démographique est particulièrement forte dans les pays émergents et en développement.
- Il est prévisible qu'en 2050 déjà, environ 70 pour cent de la population du globe vivra dans des espaces urbanisés et participera au développement économique, ce qui pourrait augmenter fortement leur consommation de ressources. Il est donc évident que les domaines du bâtiment, de la fourniture d'énergie, de la mobilité, des transports et de l'industrie joueront un rôle clé dans la trajectoire future des émissions. Si cette évolution fait l'objet d'une planification prévoyante et stimule la mise en œuvre de techniques efficaces, elle offrira la chance de promouvoir un développement durable vers un avenir à faibles émissions.
- Dans le monde entier, des changements de l'utilisation du sol (déforestation, production de denrées alimentaires etc.) sont responsables d'une part substantielle des émissions, qu'il faut également réduire. Le problème est aggravé par le fait que les régions en transformation rapide sont très souvent confrontées à des conditions politiques et économiques difficiles, à des impacts climatiques toujours plus forts et à la nécessité de mettre en œuvre également des mesures d'adaptation.
- Cette évolution de la situation démographique et sociale dans le monde exige la mise en œuvre de techniques ménageant le climat et les ressources et une transformation du style de vie dans le sens de la durabilité. Les nations industrialisées sont appelées non seulement à réaliser ce processus à l'intérieur de leurs frontières, mais aussi à fournir un soutien, du savoir-faire et des moyens financiers pour promouvoir sur le plan mondial cette tâche qui requiert l'effort de plusieurs générations. Concrètement, cela signifie entre autres de faire baisser, dans le monde entier, les besoins énergétiques des bâtiments jusqu'au minimum possible au cours des 30 à 50 années à venir; pour de nombreux pays industrialisés, cela implique d'énormes amortissements anticipés. En outre, le recours aux agents énergétiques fossiles doit diminuer sensiblement dans le secteur de l'électricité en même temps que dans celui des transports, ce qui sera coûteux vu la valeur des infrastructures existantes et prendra beaucoup de temps. C'est pourquoi il est urgent d'établir la vérité des coûts le long de toute la chaîne de transformation d'énergie, c'est-à-dire d'internaliser les coûts externes et de prendre en compte une croissance constante du prix du CO<sub>2</sub>.
- L'abandon des énergies fossiles est nécessaire pour protéger le climat, et les pays qui ne sont pas encore industrialisés feraient bien de sauter l'ère fossile. Pour que cela soit possible, l'Etat doit créer des structures appropriées offrant des conditions-cadre favorables sur le plan politique, économique et social.
- Enfin, pour mener le développement social et économique mondial sur une voie porteuse d'avenir, il faut une transformation au niveau des individus vers un style de vie durable. Vivre plus consciemment et dans le sens de la durabilité ne signifie pas renoncer à tout; cela peut, au contraire, améliorer la qualité de vie, du fait que des nuisances, comme celles des transports par exemple, qui sont actuellement croissants, diminueraient de nouveau.



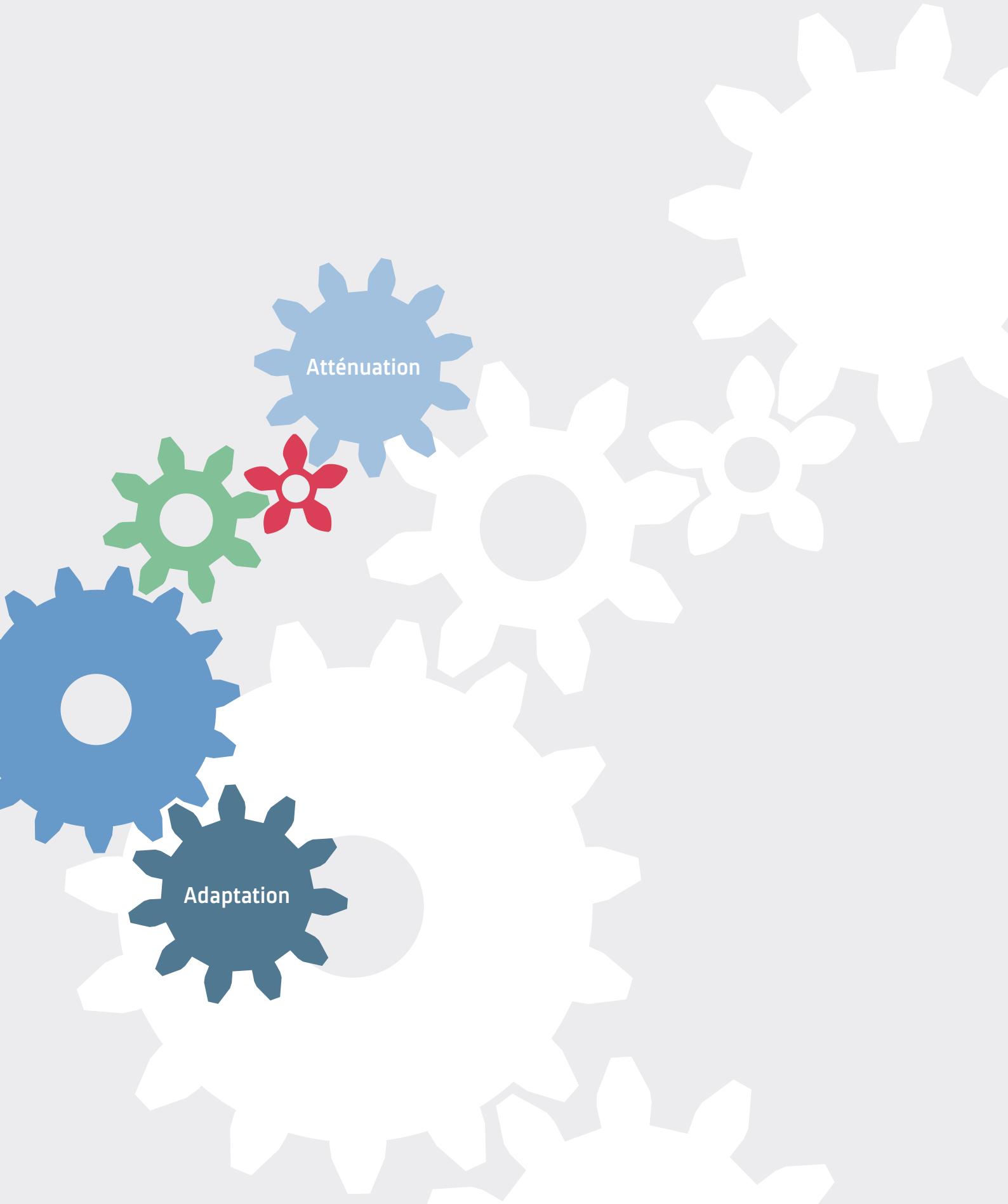
Si la Suisse entend rester sur une trajectoire compatible avec les objectifs climatiques internationaux, elle doit prendre aujourd’hui des mesures résolues et efficaces en vue d’un abandon des énergies fossiles et continuer de couvrir ses besoins d’électricité sans émissions de CO<sub>2</sub>. En outre, elle devrait poursuivre et intensifier son engagement international en faveur d’une politique climatique efficace. Indépendamment de cela, des mesures d’adaptation doivent être prises en Suisse aussi, ce qui implique une compréhension approfondie et scientifiquement fondée de la situation locale ainsi que des impacts spéci-

fiques. La transparence des coûts est également requise, de même que des mécanismes politiques contraignants pour imposer les mesures nécessaires au niveau cantonal, régional et local. Seule une base de données unifiée et solide sur la situation dans le passé et sur le changement climatique à venir permet d’évaluer et comparer les mesures envisageables et de déterminer leur ordre de priorité. Dans une démocratie directe, il importe en outre de convaincre les citoyens de l’importance des défis à affronter et de mettre en évidence les aspects positifs des changements nécessaires.

Afin de former des alliances majoritaires pour le laborieux processus politique que le changement climatique rend maintenant indispensable, il est urgent d’inscrire les thèmes susmentionnés à l’agenda de tous les citoyens, politiciens, partis et associations. L’Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) formule des lignes de conduite concrètes dans ses recommandations stratégiques 2015 en matière de politique climatique.

Cette synthèse a été élaborée en commun par les personnes suivantes: Prof. Dr Christoph Appenzeller (MétéoSuisse et EPF de Zurich), Prof. Dr Konstantinos Boulouchos (EPF de Zurich), Prof. Dr David Bresch (EPF de Zurich), Andrea Burkhardt (OFEV) Prof. Dr Andreas Fischlin (EPF de Zurich), Prof. Dr Heinz Gutscher (Université de Zurich, président du Comité directeur de ProClim), Prof. Dr Martin Hoelzle (Université de Fribourg), Prof. Dr Fortunat Joos (Université de Berne), Prof. Dr Peter

Knoepfel (Université de Lausanne), Prof. Dr Reto Knutti (EPF de Zurich), Dr Pamela Köllner (OFEV), Prof. Dr Christian Körner (Université de Bâle), Dr Christoph Kull (OcCC). Prof. Dr Peter Messerli (Université de Berne), Prof. Dr Martine Rebetez (Université de Neuchâtel et WSL), Dr Kathy Riklin (Présidente de l’OcCC), Prof. Dr Renate Schubert (EPF de Zurich), Prof. Dr Thomas Stocker (Université de Berne), Prof. Dr Philippe Thalmann (EPF de Lausanne), Prof. Dr Rolf Weingartner (Université de Berne).





# Partie 1: Fondements scientifiques

## Auteures et auteurs

### Prof. Dr Stefan Brönnimann

Professeur de climatologie à l'Institut de géographie, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

### Dr Andreas M. Fischer

Collaborateur scientifique, domaine Analyses et prévisions, Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), aéroport de Zurich

### Dr Erich M. Fischer

Chercheur senior, Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### PD Dr Christian Huggel

Chercheur senior, Impacts climatiques, risques et adaptation aux changements, groupe de recherche « glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich

### Prof. Dr Reto Knutti

Professeur de physique climatique à l'Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Peter Mani

Expert spécialisé dans les risques naturels et membre de la direction du bureau d'études géographiques geo? AG, Berne

### Dr Christoph Marty

Collaborateur scientifique, Neige et pergélisol, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF), Davos Dorf

### Dr Urs Neu

Directeur adjoint, ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

### Dr Jeannette Nötzli

Collaboratrice scientifique, Neige et pergélisol, WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF), Davos Dorf  
Jusqu'en juillet 2015: Maître-assistante, groupe de recherche « Glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich

### Dr Frank Paul

Chercheur senior, groupe de recherche « Glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich

### Dr Gian-Kasper Plattner

Direction de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf  
Jusqu'en décembre 2015: Chercheur en physique climatique et environnementale à l'Institut de physique de l'Université de Berne  
Jusqu'en décembre 2015: Directeur scientifique, Secrétariat du GIEC Groupe de travail I, Université de Berne

### Dr Joeri Rogelj

Chercheur boursier, programme Energie, Institut international d'analyses des systèmes appliqués (IIASA), Laxembourg  
Jusqu'en juin 2014: Post-doctorant, Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Prof. Dr Christoph Schär

Professeur, groupe de recherche « Climat et cycle de l'eau », Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Prof. Dr Sonia I. Seneviratne

Professeure, groupe de recherche « Interactions entre l'atmosphère et la surface terrestre », Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Prof. Dr Thomas F. Stocker

Professeur de physique climatique et environnementale à l'Institut de physique de l'Université de Berne  
Coprésident du Groupe de travail I – cinquième Rapport d'évaluation du GIEC



## Explications préliminaires

### Indications de probabilité utilisées dans le présent rapport

Le présent rapport a parfois recours, pour des conclusions isolées du GIEC, aux données relatives à la probabilité d'un résultat telles qu'elles sont exploitées dans le rapport d'évaluation du GIEC (sont concernées les données de probabilité exprimées en italique dans le présent

rapport). L'indication désigne la probabilité estimée selon laquelle la valeur effective ou le fait réel se situent dans la plage de valeurs indiquée ou, le cas échéant, correspond au fait indiqué. Les expressions exprimées en italique correspondent aux plages de probabilité :

|                                      |                        |
|--------------------------------------|------------------------|
| <i>quasiment certain</i>             | 99–100% de probabilité |
| <i>très probable</i>                 | 90–100%                |
| <i>probable</i>                      | 66–100%                |
| <i>aussi probable qu'improbable</i>  | 33–66%                 |
| <i>improbable</i>                    | 0–33%                  |
| <i>très improbable</i>               | 0–10%                  |
| <i>exceptionnellement improbable</i> | 0–1%                   |

### Cinquième Rapport d'évaluation du GIEC

Certaines affirmations contenues dans le présent rapport renvoient au cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, lequel a été publié en trois volumes en 2013 (vol. I) et 2014 (vol. II et III).<sup>1</sup>

- Le tome I (Les éléments scientifiques) présente des conclusions claires et solides dans le cadre d'une évaluation globale de la science du climat. Les résultats corroborent et élargissent nos connaissances scientifiques du système climatique et du rôle des gaz à effet de serre.
- Le volume II (Incidence, adaptation, et vulnérabilité) est consacré aux enjeux du changement climatique et analyse cette problématique tant sur un plan global (Partie A) que régional (Partie B). Il traite des répercussions d'ores et déjà observées et des risques de répercussions futures.
- Le volume III (L'atténuation du changement climatique) propose une évaluation complète de toutes les options d'atténuation du changement climatique (de nature technique ou relevant de changements comportementaux) dans les secteurs de l'énergie, des transports, du bâtiment, de l'industrie et de l'utilisation des terres, et évalue les options politiques à différents niveaux de gouvernance, de l'échelle locale à l'échelle internationale.

### Le GIEC

Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a été créé en 1988 par deux institutions des Nations Unies : l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE). Il met à la disposition des décideurs politiques les expertises objectives scientifiques et techniques les plus fiables. Depuis 1990, cette série de rapports d'évaluation du GIEC, de rapports spéciaux, de documents techniques, de rapports de méthodes et autres produits s'est imposée comme un ouvrage de référence. Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC représente une base d'information majeure à destination des décideurs politiques à l'échelle de la planète et soutient ces derniers dans la gestion des défis des changements climatiques. L'élaboration du présent rapport a été rendue possible grâce à l'engagement et aux efforts de plusieurs centaines d'expertes et d'experts bénévoles du monde entier couvrant un large spectre de disciplines.

### Qu'entend-on par « protection du climat » ?

Selon le Duden allemand, la notion de protection du climat désigne, en substance, l'« ensemble des mesures prises en vue de l'atténuation des changements climatiques indésirables ». Ce terme n'est utilisé que dans l'espace germanophone. Le GIEC n'emploie pas de terme (anglais) équivalent.

<sup>1</sup> [www.ipcc.ch/report/ar5](http://www.ipcc.ch/report/ar5)

## Pourquoi a-t-on besoin de scénarios climatiques ? Les phénomènes de crues « impensables » dans la pratique et en sciences

**Le passé prouve qu'il faut également penser à « l'impensable » dans le domaine des phénomènes extrêmes. La pratique et la science sont également concernées par ces questions et une collaboration est absolument indispensable. Il est ainsi nécessaire de développer de nouvelles méthodes afin d'analyser les risques extrêmes, par exemple dus à une combinaison éminemment rare d'événements aux répercussions de très grande ampleur. Ces méthodes doivent prendre en compte à la fois les événements passés et les changements climatiques.**

*Peter Mani (geo7 AG), Christoph Schär (EPF de Zurich)*

### Introduction

Les grands phénomènes de crues de ces dernières années (1999, 2005, 2007) ont provoqué d'immenses dommages (Hilker et al. 2009). Différentes études montrent que des événements d'encore plus grande envergure sont possibles. Après un hiver marqué par un enneigement très fort, une fonte des neiges extrême, suivie par trois jours de pluie intense, a ainsi provoqué des crues record en 1480 (Pfister & Wetter 2011). « L'année sans été » due à l'éruption du volcan Tambora a provoqué, au printemps 1817, la fonte de trois masses neigeuses qui a été à l'origine, à son tour, du plus haut niveau des eaux jamais mesuré pour le lac de Constance, et ce pendant 89 jours consécutifs (Kobelt 1926 ; Pfister 1999). L'étude réalisée par geo7 et al. (2007) sur les crues extrêmes dans le bassin versant de l'Aar montre que de tels phénomènes exceptionnels sont également possibles à l'avenir et qu'ils impliquent des conséquences potentielles d'envergure pour la société, l'économie et l'environnement.

De tels événements touchent généralement de vastes zones et menacent les zones urbanisées, mais aussi les infrastructures vitales que sont les hôpitaux, les réseaux d'alimentation en eau potable, de transport et de communication de même que des structures critiques comme les centrales nucléaires ou les barrages hydrauliques. Les défis qui en découlent sont énormes, d'autant plus que la Suisse a rarement été concernée par des catastrophes entre la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et les années 1970 (Pfister 2009), ce qui a alimenté un faux sentiment de sécurité ainsi qu'une sensibilité insuffisante face aux phénomènes exceptionnels.

Les crues extrêmes peuvent résulter de pluies fortes et brèves ou de longues périodes de précipitations. Le déséquilibre du système hydrologique provoqué par une telle charge peut avoir des effets de basculement ou de rétroaction. Ainsi, le dépôt d'alluvions dans le lit d'un cours d'eau en diminue les capacités d'écoulement et de transport, ce qui amplifie encore cette accumulation. La fréquence et l'intensité de ces situations peuvent encore

s'accroître à cause des changements climatiques, qui font que les séries temporelles observées par le passé perdent leur valeur d'échelle pour le futur. Elles doivent donc être associées aux constats issus des scénarios climatiques et faire l'objet d'une nouvelle pondération.

La catastrophe nucléaire de Fukushima montre que des événements extrêmement rares peuvent tout à fait se produire : au large de la côte est du Japon, le 11 mars 2011 marque le plus fort tremblement de terre jamais enregistré depuis que de tels relevés existent. Le tsunami qu'il a déclenché a dévasté de larges parties de cette côte en faisant plus de 20 000 victimes et en endommageant près d'un million de bâtiments (GRS 2015). Il détruit également d'importants systèmes de sécurité de la centrale nucléaire Fukushima Daiichi, entraînant ainsi la fusion de quatre blocs du réacteur. Près de 150 000 personnes furent évacuées et la réparation des dégâts durera encore plusieurs décennies.

En Suisse aussi, des phénomènes extrêmement rares, en particulier des crues, peuvent avoir des conséquences dramatiques : la plupart des grandes villes se trouvent au bord d'un fleuve et toutes les centrales nucléaires sur les rives de l'Aar ou du Rhin. C'est pourquoi, après Fukushima, l'analyse des crues rares est également d'actualité en Suisse.

### Projet EXAR : évaluation des conséquences des crues extrêmes de l'Aar et du Rhin

L'EXAR (Bases crues extrêmes Aar-Rhin) est un projet suisse ayant pour objectif de créer de nouvelles bases pour évaluer les conséquences des crues très rares à partir de séries de mesures existantes, d'analyses de crues historiques et des résultats de simulations climatiques. Il a vu le jour à l'initiative des offices fédéraux de l'environnement (OFEV), de l'énergie (OFEN) et de la protection de la population (OFPP) ainsi que de l'Inspection fédérale de la sécurité nucléaire (IFSN).



Figure 1.1: La crue d'août 2005 a causé de gros dégâts notamment à Oey/BE. A l'échelle de la Suisse, elle a coûté trois milliards de francs.  
(Source: Fritz Schürch)

Dans une première étape, des bureaux d'ingénieurs et des entreprises de conseil ont développé avec l'aide d'un groupe d'experts scientifiques une méthode permettant d'analyser les crues extrêmes en considérant les pics, la durée et le volume de leur débit, leurs répercussions sur la morphologie du cours d'eau et l'influence des matériaux flottants (fig. 1.2). Etant donné qu'il s'agit ici de phénomènes très rares qui peuvent ne se produire que tous les 10 000 ans, les conclusions sur les incertitudes sont d'une importance centrale au même titre que les valeurs quantitatives sur l'ampleur des événements. Il est nécessaire de prendre en considération la variabilité naturelle intrinsèque du système tout comme l'incertitude du modèle. La deuxième étape prévoit à présent d'effectuer les analyses à l'aide de la méthode mise au point.

## L'influence des changements climatiques

Les conditions météorologiques qui engendrent des précipitations fortes et des crues sont déterminées, au final, par le système climatique mondial. Dans l'espace alpin, la vaste répartition des températures et de l'humidité de l'air, la position, l'intensité et la trajectoire des zones de dépression ainsi que les changements de l'hydrologie de la neige liés à la température sont décisifs. Leurs effets sur le climat estival sont particulièrement importants puisque c'est en été que de nombreux cours d'eau atteignent le niveau maximum de leur crue en Suisse. Il est toutefois également nécessaire de prendre en compte les changements qui interviennent en hiver, car les précipitations y tombent de plus en plus sous forme de pluie plutôt que de neige suite au réchauffement.

L'approche classique adoptée pour traiter de telles questions s'appuie sur une chaîne réunissant des modèles mon-

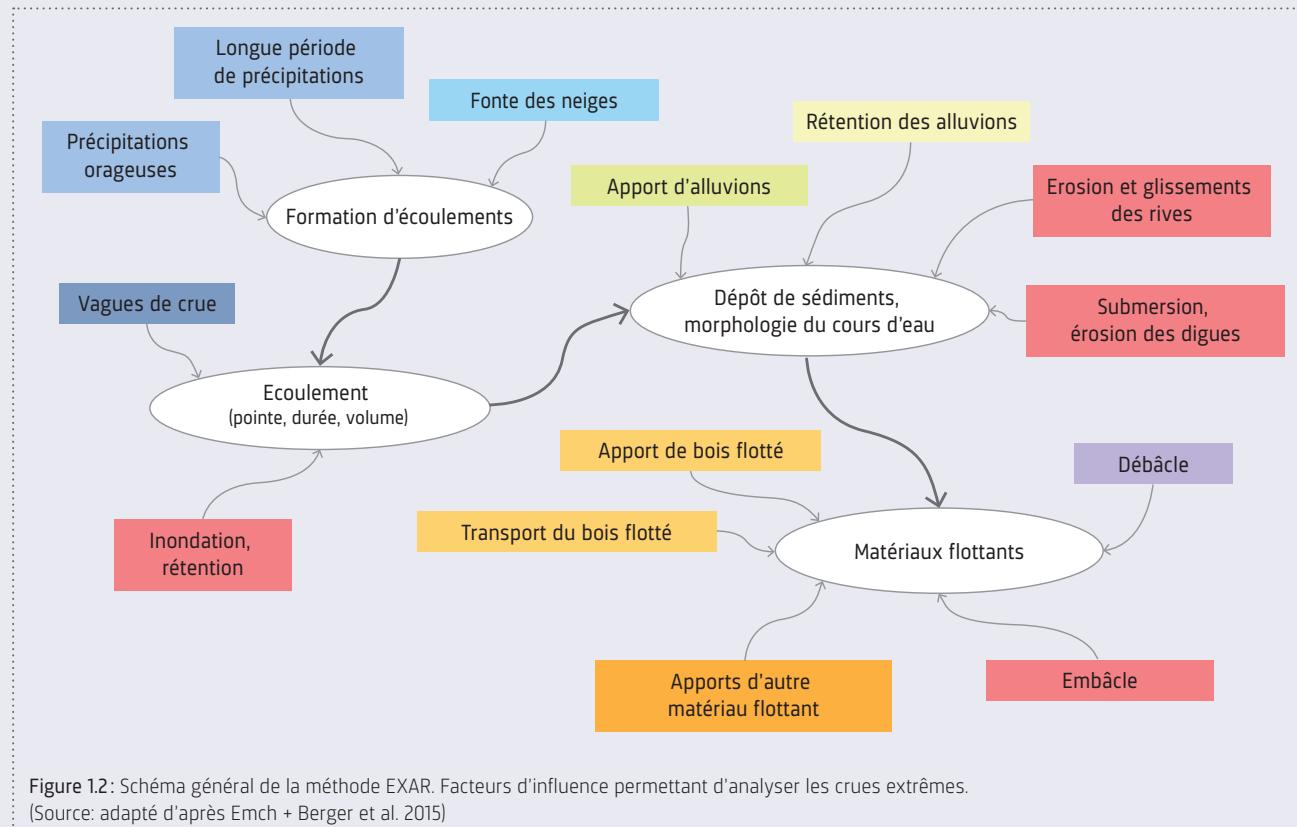


Figure 1.2: Schéma général de la méthode EXAR. Facteurs d'influence permettant d'analyser les crues extrêmes.  
(Source: adapté d'après Emch + Berger et al. 2015)

diaux et régionaux élaborés à partir de scénarios d'émissions. Cette chaîne peut également, dans une étape ultime, aboutir à des modèles hydrologiques. Depuis 10 ans environ, les différents modèles climatiques se rejoignent et prévoient, en été, une diminution des précipitations moyennes en Europe centrale (CH2011 2011; Rajczak et al. 2013). Dans le même temps, ces modèles indiquent que les pointes de précipitations quotidiennes augmentent légèrement et que les pointes de précipitations horaires évoluent nettement (Ban et al. 2015; Giorgi et al. 2016; Scherrer et al. 2016). Jusqu'ici cependant, les études de ce type ont uniquement analysé des phénomènes comparativement fréquents d'une récurrence maximale de 50 à 100 ans.

Il est également possible de faire des déductions sur l'évolution des crues dans le cadre des changements climatiques à partir d'événements passés dès lors que des indices correspondants peuvent être obtenus en se basant sur de longues périodes issues des archives climatiques naturelles. Récemment, la fréquence des grandes inondations d'été a été reconstituée pour les 2500 dernières années en se basant sur les sédiments prélevés dans 10 lacs alpins (Glur et al. 2013). Les résultats montrent que les grandes crues sont plus fréquentes au cours des étés relativement frais, ce qui concorde avec des études plus anciennes qui avaient constaté une plus forte fréquence des crues graves au cours du petit âge glaciaire et une fré-

quence réduite pendant la période chaude du Moyen Age (Schmocke-Fackel et al. 2010). Ces résultats sont qualitativement cohérents avec la diminution des précipitations estivales prévue par les modèles climatiques, en particulier lorsque l'on considère que l'augmentation projetée des précipitations fortes correspond à des phénomènes brefs et généralement localisés et non pas à des événements de large ampleur comme ce fut le cas pour les inondations estivales du mois d'août 2005. En d'autres termes, il se peut donc que les phénomènes brefs et localisés se multiplient et s'intensifient alors que les événements de large ampleur pourraient diminuer.

## Défis futurs

Bien qu'une compréhension de qualité commence à se dessiner pour la sensibilité du climat estival (vaste diminution des précipitations associée à leur intensification) et les fortes précipitations, de grosses incertitudes demeurent. Il convient en particulier de souligner que des conclusions quantitatives fiables sont possibles uniquement pour les phénomènes relativement fréquents d'une récurrence inférieure à 100 ans, et ce même lorsque l'on ne tient pas compte des changements climatiques. Des questions subsistent dans les domaines suivants :

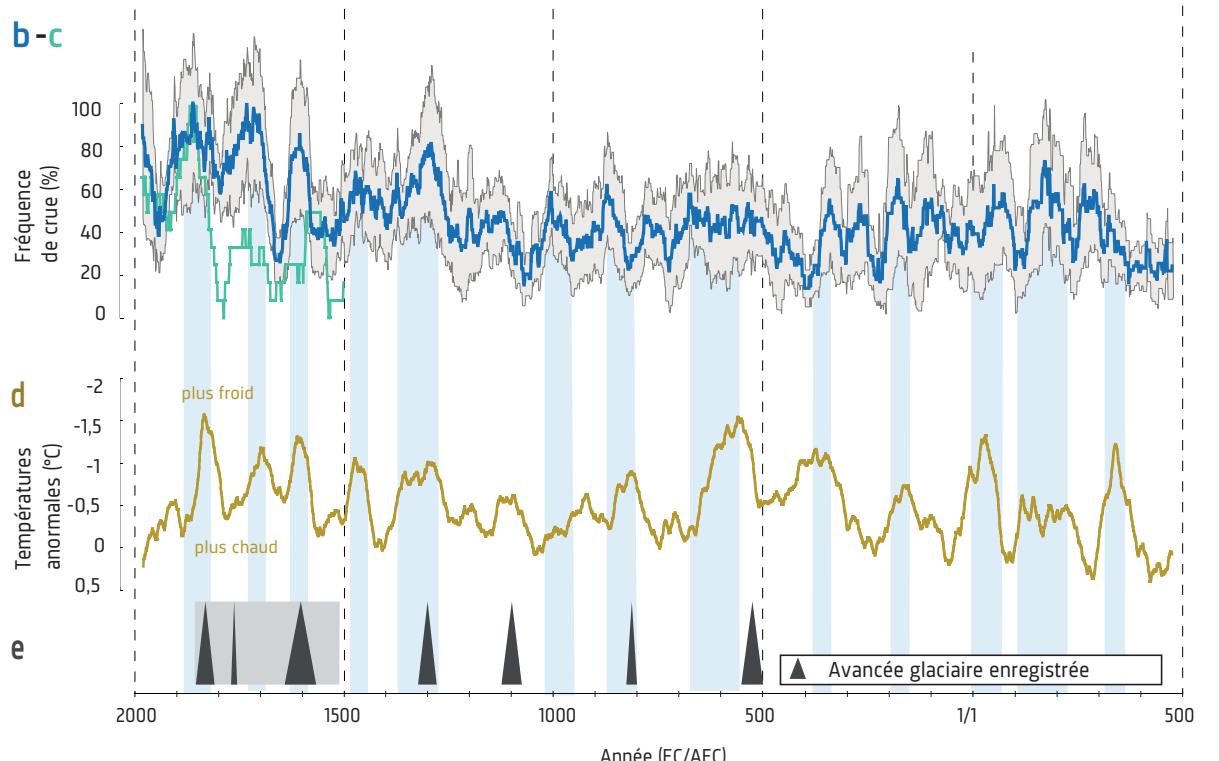


Figure 1.3: Comparaison entre températures anormales et fréquence des crues. Les crues de grande ampleur ont plus souvent eu lieu lors des phases d'été frais que lors des phases d'été chaud. (Source: Glur et. al. 2013)

- Chaînes d'événements hydrométéorologiques: il s'agit d'une combinaison d'événements rares pertinents pour l'hydrologie. Notre introduction en donne un exemple: la coïncidence d'une accumulation de neige sur deux hivers, d'un été marqué par l'irruption du volcan Tambora, d'une fonte intense des neiges et de précipitations fortes.
- Hydrologie de la neige: l'augmentation des pluies au détriment de la neige est principalement due aux températures et peut avoir une grande influence sur l'écoulement (OFEV 2012). En raison de sa capacité à stocker l'eau, la neige a souvent un effet amortissant. Avec l'élévation de la limite des chutes de neige, certains scénarios de crue vont gagner en probabilité.
- Variabilité interne du système climatique: une modification des fluctuations naturelles comme la fréquence des conditions météorologiques (d'une échelle de jours à une échelle d'années) pourrait avoir une influence décisive sur la fréquence des phénomènes extrêmement rares. Outre la variabilité interannuelle (d'une année à l'autre), des échelles courtes sont également importantes. Si la persistance des conditions météorologiques venait à changer, par exemple, cela pourrait provoquer de longues phases de précipitations ou de sécheresse.

## Conclusion

Au cours des 10 dernières années, la modélisation du système climatique a fait des progrès significatifs, notamment dans le domaine des phénomènes extrêmes. Un projet tel qu'EXAR aurait donc été à peine envisageable il y a dix ans, car les incertitudes dans les résultats de modélisation étaient encore difficilement quantifiables. La modélisation hydrologique a, elle aussi, bien progressé et permet, aujourd'hui, de simuler des chaînes d'événements complexes. Il est ainsi dorénavant possible d'esquisser des informations importantes même pour les phénomènes très rares. Des défis de taille subsistent cependant toujours, par exemple dans le contexte des modifications de variabilité ou dans l'observation d'une succession inattendue de plusieurs événements.

Quoi qu'il en soit, nous ne devons pas oublier qu'il n'existe aucune sécurité absolue et qu'il restera toujours des «inconnues inconnues», c'est-à-dire des facteurs ou des développements inconnus dont personne n'est conscient, ce qui ne dispense toutefois personne de s'appuyer sur les estimations existantes.

## Bibliographie

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2014) **Evaluation of the convection-resolving regional climate modelling approach in decade-long simulations.** Journal of Geophysical Research 119: 7889–7907.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011.** Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Emch + Berger, geo7, HydroCosmos (2015) **Extreme flooding events Aare-Rhein (EXAR).** Methodology report.
- Geo7, IUB Ingenieur Unternehmung, Hunziker, Zarn & Partner, Emch + Berger (2007) **Crues extrêmes dans le bassin versant de l'Aar (Résumé).** Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du canton de Berne.
- Giorgi F, Torma C, Coppola E, Ban N, Schär C, Somot S (2016) **Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming.** Nature Geoscience 9: 584–589.
- Glur L, Wirth SB, Büntgen U, Gilli A, Haug GH, Schär C, Beer J, Anselmetti FS (2013) **Frequent floods in the European Alps coincide with cooler periods of the past 2500 years.** Scientific Reports 3: 2770.
- GRS (2015) **Fukushima Daiichi – Unfallablauf, radiologische Folgen.** Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) (4th ed.).
- Hilker N, Badoux A, Hegg C (2009) **The Swiss flood and landslide damage database 1972–2007.** Natural Hazards and Earth System Sciences 9: 913–925.
- Kobelt K (1926) **Die Regulierung des Bodensees. Hochwasserschutz, Kraftwerknutzung und Schiffahrt.** Bern.
- OFEV (2012) **Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau.** Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1217: 76 pp.
- Pfister C (1999) **Wetternachhersage: 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen (1496–1995).** Haupt Verlag, Bern.
- Pfister C (2009) **Die «Katastrophenschlucht» des 20. Jahrhunderts und der Verlust traditionalen Risikobewusstseins.** GAIA 3: 239–246.
- Pfister C, Wetter O (2011) **Das Jahrtausendhochwasser von 1480 an Aare und Rhein.** Berner Zeitschrift für Geschichte und Heimatkunde 73: 41–49.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region.** Journal of Geophysical Research Atmospheres 118: 3610–3626.
- Scherrer SC, Fischer EM, Posselt R, Liniger MA, Croci-Maspoli M, Knutti R (2016) **Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121: 2626–2637.
- Schmocke-Fackel P, Naef F (2010) **Changes in flood frequencies in Switzerland since 1500.** Hydrology and Earth System Sciences 14: 1581–1594.

## 1.1 Introduction

**Le réchauffement du système climatique est sans équivoque» et «l'influence de l'homme sur le système climatique est clairement établie». Ces affirmations centrales du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC ne font pas que réduire le cœur du problème à sa plus brève expression, mais elles mettent aussi en évidence que des décennies de recherche et d'observations du système climatique ont conduit à des résultats clairs, même si de nombreuses questions sont encore ouvertes.**

*Urs Neu (ProClim/SCNAT)*

### Les températures montent – et nous savons pourquoi

En moyenne mondiale, la surface de la Terre se réchauffe considérablement depuis plusieurs décennies (cf. chap. 1.6 La température, p. 40) – et nous savons pourquoi. Les émissions croissantes de gaz à effet de serre – en particulier de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) –, dues à la consommation de combustibles et carburants fossiles ainsi qu'au déboisement des forêts tropicales et à l'utilisation du sol, modifient le bilan radiatif de la planète. Dans l'atmosphère, des gaz tels que le dioxyde de carbone, la vapeur d'eau, le méthane ou le protoxyde d'azote exercent une action comparable à celle des vitres d'une serre – ils empêchent la propagation efficace du rayonnement vers l'extérieur. Le processus physique est certes différent et plus complexe. Mais il est bien étudié scientifiquement, ce qui permet d'évaluer son action de manière fiable. Nous savons aussi que cette évolution du climat est exceptionnelle : nous le constatons au fait que pendant les 800 000 dernières années, la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère n'a guère dépassé 280 ppm (parties par million) – mais qu'au cours de sa progression actuelle, elle a franchi en avril 2014 pour la première fois la marque des 400 ppm et atteint ainsi un niveau de 40 pour cent plus élevé.

### Rétroactions complexes

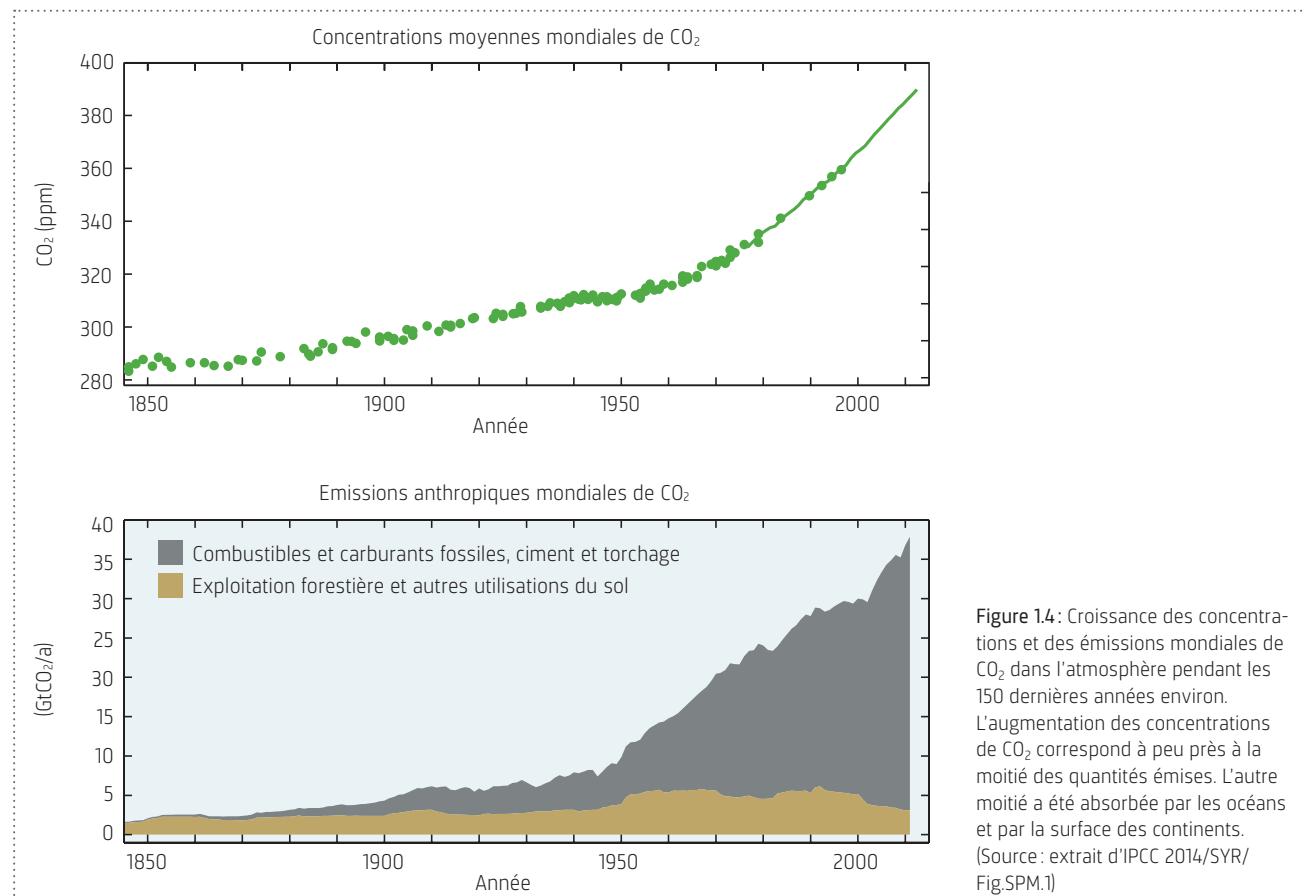
Le système climatique n'est pas constitué seulement de l'atmosphère, mais est influencé aussi par les océans, la glace et la neige, le sol, la végétation et les terres exploitées par l'homme. Ces composantes sont en échange permanent avec l'atmosphère. Si l'une d'entre elles se modifie, les autres changent également. Il s'ensuit qu'un réchauffement de l'atmosphère induit des changements dans l'ensemble du système, et que ceux-ci ont à leur tour des impacts sur le tout. Cette série de rétroactions peut affaiblir ou renforcer le changement initial.

Un exemple d'une telle rétroaction est qu'un réchauffement est encore renforcé du fait qu'il entraîne une augmentation de la teneur de l'air en vapeur d'eau, cette dernière étant considérée comme le plus important des gaz à effet de serre. C'est là un effet bien connu. Un autre exemple est le mode d'action des nuages : une hausse de l'évaporation et de la quantité d'eau dans l'air modifie la couverture nuageuse, mais on ne sait pas exactement comment. Des nuages élevés intensifient le réchauffement (ils sont peu épais et agissent comme des gaz à effet de serre), à basse altitude ils ont un effet refroidissant (ils réfléchissent le rayonnement solaire). Les effets de réchauffement prédominent probablement, mais les incertitudes sont considérables.

Le principe de base est donc le suivant : plus il y a de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, plus le réchauffement est fort. Certes, nous ne connaissons pas son ampleur exacte, mais savons approximativement dans quelle fourchette elle se situe : un doublement de la concentration de  $\text{CO}_2$  entraîne entre deux et quatre degrés Celsius de réchauffement. Des observations récentes (cf. chap. 1.2 Le climat du passé, p. 32) montrent l'effet des émissions anthropiques ; celles relatives à un passé lointain nous montrent quel peut être l'impact de modifications du système climatique et nous permettent de placer les changements observés et attendus dans un contexte historique.

### Fluctuations naturelles et influence humaine

Le climat a changé de nombreuses fois au cours de l'histoire de la Terre (cf. chap. 1.2 Le climat du passé, p. 32), ceci à des échelles de temps différentes suivant le facteur d'influence considéré : des millions d'années (effet de la dérive des continents), de 10 000 à 100 000 ans (modification des paramètres de l'orbite terrestre) ou d'environ 10 à 1000 ans (variation du rayonnement solaire ou de l'activité volcanique). Des changements de l'ordre de grandeur du réchauffement en cours ont duré nettement plus longtemps que ce n'est le cas aujourd'hui. La dernière fois qu'il a fait 1 à 1,5 degrés Celsius plus chaud qu'aujourd'hui au niveau planétaire remonte à la dernière période interglacière.



ciaire, il y a environ 120 000 ans. Le niveau de la mer était alors entre cinq et dix mètres plus haut qu'aujourd'hui. Il y a trois millions d'années, il a fait pour la dernière fois environ trois degrés Celsius plus chaud qu'aujourd'hui sur la Terre (c'est à peu près ce qui nous attend d'ici la fin du siècle dans l'hypothèse d'un scénario d'émission moyen); le niveau de la mer était alors environ 20 mètres plus élevé qu'aujourd'hui. Cependant, cette situation s'est développée sur une période probablement beaucoup plus longue que celle attendue pour le changement qui se déroule actuellement.

Le climat mondial aussi bien que régional subit des fluctuations naturelles d'année en année et à des échelles de temps qui s'étendent à quelques décennies (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique : les fluctuations à court terme du climat, p. 34). Ces fluctuations sont en partie la conséquence de facteurs d'influence externes, tels que les variations de l'activité solaire ou volcanique, ainsi que de phénomènes internes du système climatique, comme El Niño/La Niña dans le Pacifique tropical. Une partie importante de ces fluctuations ont toutefois un caractère aléatoire et sont alors, encore aujourd'hui, difficiles à prévoir. D'une année à l'autre, ou sur quelques décennies, cette variabilité naturelle peut largement prédominer au

niveau régional sur les effets du changement climatique. C'est pourquoi il faut souvent quelques décennies jusqu'à ce que la tendance à long terme du changement climatique anthropique, même à l'échelle régionale, ressorte clairement des fluctuations naturelles.

## Où est le problème ?

Pourquoi faut-il s'inquiéter d'un réchauffement du système climatique ? Si nous nous référons à l'histoire de la Terre, nous n'évoluons en fait pas vers une situation vraiment nouvelle. Toutefois, cette conclusion n'est vraie que si nous faisons abstraction des impacts sur l'homme et sur les écosystèmes actuels. Avec le réchauffement, tous les paramètres influencés par la température changeront. Si nous reconnaissons que le cycle hydrologique sera aussi fortement touché, que des événements extrêmes auront des impacts sur la production de denrées alimentaires et que l'élévation du niveau de la mer fera disparaître des territoires – pour ne citer que quelques exemples –, nous devons admettre que le changement climatique pose un problème de ressources.

C'est ainsi que le terme de « protection du climat », utilisé à propos des mesures de lutte contre le changement climatique, doit être compris dans un sens large comme la préservation de nos conditions d'existence, de la sécurité des ressources et des services écosystémiques, tous influencés par l'évolution du climat. Il ne s'agit donc pas de sauvegarder le climat, mais beaucoup plus largement de protéger la société humaine contre un changement climatique indésirable. La nature s'adaptera sans doute aux nouvelles conditions. Mais pour notre société, ou du moins pour de grandes parties de celle-ci, une telle évolution peut être un immense défi. Avec la progression du changement climatique, nous touchons à des limites où une adaptation ne sera plus possible parce que les ressources seront devenues trop rares ou ne seront plus disponibles. Imaginons une carte géographique pour un niveau de la mer de 5 mètres plus élevé qu'aujourd'hui, sans même parler d'une élévation de 20 mètres.

L'évolution du climat ne se manifeste pas seulement par un changement de la température, mais a des impacts aussi sur les paramètres décrivant d'autres phénomènes, tels que les précipitations, l'évaporation, les courants atmosphériques et océaniques. Non seulement les moyennes, mais également la répartition temporelle et spatiale de ces paramètres sont influencées, de même que l'ampleur que peuvent atteindre des événements extrêmes tels que les canicules, les fortes précipitations ou les sécheresses. Le changement de tous ces paramètres a une incidence sur de nombreux domaines de notre vie et sur notre environnement, par exemple sur la faune et la flore, la couverture neigeuse, les glaciers, le pergélisol. Ces impacts sont décrits dans la Partie 2 : Incidence et adaptation, p. 69.

## L'évolution future

L'évolution du climat à laquelle il faut s'attendre pendant les toutes prochaines décennies est déjà pratiquement tracée. Cela tient en partie au fait que le système climatique réagit avec un certain retard aux changements du bilan radiatif, notamment parce que l'ajustement de la température des océans aux nouvelles conditions prend des décennies, voire des siècles. La principale raison est toutefois qu'à court terme, les émissions sont déterminées dans une large mesure par nos infrastructures et par notre société, mais que nous ne pouvons transformer celles-ci substantiellement qu'à longue échéance (Matthews & Solomon 2013). L'évolution à long terme des émissions n'étant pas connue, la climatologie travaille avec des scénarios qui représentent différents développements de ces rejets (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38). Une chose est certaine : les émissions actuelles – avant tout celles de dioxyde de carbone, qui a une longue durée de vie – exercent leur ef-

fet encore pendant des siècles, voire des millénaires. Les possibilités de réduire les émissions et d'atténuer ainsi le changement climatique sont traitées dans la Partie 3: Atténuation, p. 149.

## Beaucoup de choses sont connues – des questions restent ouvertes

La précision avec laquelle les développements des phénomènes mentionnés peuvent être évalués est très variable. Elle dépend surtout de la complexité des processus physiques impliqués et du nombre de facteurs qui interviennent. Les moyennes mondiales notamment – qui sont déterminées en premier lieu par le bilan radiatif et par les lois fondamentales de la physique (exemple : la capacité d'absorption d'eau par l'air) – peuvent être comparativement bien évaluées et modélisées; il en va de même de la température et des valeurs extrêmes qui lui sont liées, telles que les vagues de chaleur et les jours de canicule (cf. chap. 1.4 Les modèles climatiques, p. 36). Cela tient à la répartition plutôt uniforme de la température, qui rend les mesures de cette grandeur représentatives de surfaces relativement importantes.

Il est comparativement difficile de se prononcer sur :

- le changement climatique régional : celui-ci est influencé en premier lieu par la distribution de la chaleur et par les modifications des courants atmosphériques et océaniques, ainsi que par des processus qui se déroulent sur la terre ferme et par la couverture de glace – autant d'aspects beaucoup plus difficiles à spécifier que des paramètres globaux,
- les phénomènes associés à des fluctuations naturelles telles qu'El Niño : la majorité d'entre eux ne sont pas encore pris en compte de façon satisfaisante par les modèles climatiques et
- les phénomènes liés au cycle hydrologique, par exemple les nuages : la distribution de l'eau est à très petite échelle ; les mesures locales sont peu représentatives ; la taille de nombreux phénomènes est inférieure à la résolution des modèles climatiques.

## Différents degrés de prévisibilité des changements

En Suisse, le changement climatique se manifeste aujourd'hui déjà clairement par certains développements, avant tout par ceux où la température joue un rôle déterminant – à savoir la température elle-même (cf. chap. 1.6 La température, p. 40) et, en montagne, les processus de fonte des glaciers, du pergélisol et de la couverture neigeuse (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80). En ce qui concerne le cycle hydrologique (cf. chap. 1.7

Le cycle hydrologique, p. 46) et les événements extrêmes (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52), les fluctuations naturelles sont, comme déjà mentionné, très grandes et les processus se déroulent à très petite échelle ; c'est pourquoi les tendances observées aussi bien que l'évolution future sont, par la force des choses, beaucoup moins sûres.

Cependant, quelques processus et phénomènes physiques font apparaître comme très probables certains changements des précipitations et des extrêmes qui leur sont associés et ressortent aussi relativement clairement des résultats des modèles climatiques. Ce sont par exemple :

- Une tendance à l'extension des zones subtropicales en direction des pôles : La zone climatique méditerranéenne très sèche en été/automne s'étend de plus en plus vers le nord et englobe également peu à peu la Suisse. Une conséquence en est que les précipitations diminuent en été et que l'intensité et la durée des phases sèches augmentent en été/automne. L'ampleur de cette évolution diffère considérablement d'un modèle climatique à l'autre.
- L'augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère : Ceci se manifeste par un accroissement général des précipitations. Cependant, ces changements ont lieu dans des situations géographiques propres à des régions subtropicales devenant plus sèches et à des zones devenant plus humides aux hautes latitudes. En matière de pluviométrie, la Suisse est située ainsi à la limite entre une augmentation au nord et une diminution au sud. Cela signifie que la somme annuelle des précipitations ne changera pas beaucoup, mais qu'il peut néanmoins y avoir des changements saisonniers. Les modèles climatiques prévoient une diminution des précipitations moyennes en été dans toute la Suisse et une augmentation pendant les autres saisons dans certaines parties du pays.

Les changements de la circulation atmosphérique aux latitudes moyennes sont une inconnue relativement importante dans l'évolution du climat régional aux latitudes moyennes. Il en est de même pour les conséquences du réchauffement plus rapide dans l'Arctique que sous les tropiques et pour les modifications découlant de la différence entre les températures au nord et au sud. Etant donné que cette différence est le moteur des courants atmosphériques, son changement pourrait avoir une incidence notable sur le type et la fréquence des régimes des vents. Différents processus possibles sont discutés actuellement par les scientifiques, mais aucun résultat clair ne ressort encore de cette réflexion. Un effet possible serait que des situations météorologiques identiques ou semblables persistent plus longtemps et produisent, rien que par leur durée, des conditions extrêmes, telles qu'un temps trop sec ou excessivement humide ainsi que de hauts ou bas

niveaux des eaux (des lacs, cours d'eau et eaux souterraines).

## La Suisse est plus touchée qu'en moyenne par certains changements et peu par d'autres

En raison de sa topographie, la Suisse est plus concernée qu'en moyenne par des phénomènes en rapport avec la fonte des glaciers, le dégel du pergélisol et la diminution des chutes de neige. Dans ce contexte, l'albédo joue un rôle important dans l'arc alpin : à cause du recul de la couverture neigeuse, le sol absorbe davantage de chaleur et renforce ainsi le réchauffement. En effet, la surface claire de la neige réfléchit en très grande partie le rayonnement solaire incident, alors que le sol sombre en absorbe la majorité. En été, des rétroactions avec le degré d'humidité du sol jouent également un rôle important pour les extrêmes de chaleur : quand les sols sont secs, l'énergie qui sert normalement à l'évaporation produit une augmentation supplémentaire de la température de l'air. En revanche, la Suisse est moins concernée par des changements des précipitations moyennes que le sont, par exemple, de nombreux pays en développement des régions tropicales et subtropicales. L'été fait exception : la baisse des précipitations pourrait être substantielle (jusqu'à près de 30 pour cent) pendant cette saison. Les changements qui se produisent dans les océans (cf. chap. 1.9 Les océans et la cryosphère, p. 60) n'ont pas de conséquences directes pour notre pays ; la montée du niveau de la mer, notamment, ne le menace pas, alors qu'elle aura des impacts considérables dans les régions concernées : à moyen terme déjà, elle fera disparaître ou rendra inhabitables des îles entières, et à long terme, elle menacera même des métropoles telles que New York ou Mumbai, qui sont situées sur le littoral. Ces changements peuvent néanmoins avoir indirectement des incidences en Suisse, par exemple s'ils provoquent, dans des régions pauvres, des crises et des problèmes qui augmentent la pression de l'immigration (cf. chap. 2.16 La migration dans le réseau d'interdépendances globales, p. 136).

## Bibliographie

IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)

Matthews D, Solomon S (2013) *Irreversible does not mean unavoidable*. Science 340: 438–439.

## 1.2 Le climat du passé

L'étude du climat du passé est nécessaire pour mettre en perspective l'actuel changement climatique. Elle se fonde sur d'anciennes mesures instrumentales, des documents historiques, les anneaux de croissance des arbres, des sédiments lacustres ou des carottes de glace. Les reconstitutions du climat montrent par exemple qu'en Suisse, les températures d'été des derniers 25 ans sont nettement au-dessus de la bande de variation de ces températures au cours des 330 dernières années.

Stefan Brönnimann (Université de Berne)

Des analyses du climat du passé sont indispensables pour donner la mesure des changements climatiques qui se déroulent aujourd'hui. L'examen de carottes de glace montre par exemple que les concentrations de CO<sub>2</sub>, de méthane et de protoxyde d'azote – des gaz à effet de serre – sont plus élevées aujourd'hui qu'elles n'ont jamais été pendant les 800 000 dernières années. La comparaison entre les températures mesurées aujourd'hui et des reconstitutions du climat passé prouve que la température annuelle moyenne de l'hémisphère Nord de 1983 à 2012 a été *très probablement*<sup>1</sup> plus haute que pendant toute autre période de trente ans des 800 dernières années, voire *probablement* aussi des 1400 dernières années. A l'échelle continentale, il y a peut-être eu toutefois, au Moyen Age, des phases de plusieurs décennies aussi chaudes que certaines périodes de la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (IPCC 2014/WGI/Chap.5). Depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle, le niveau de la mer est monté plus rapidement qu'en moyenne au cours des derniers 2000 ans (IPCC 2013/WGI/SPM). La situation est moins explicite pour les sécheresses et les crues, où des facteurs non climatiques jouent également un rôle : pendant les derniers mille ans, il y a eu des sécheresses plus intenses et de plus longue durée que celles observées depuis 1900 ; considérées dans le contexte des derniers mille ans, les magnitudes actuelles des crues en Europe ne sont pas inhabituelles (IPCC 2014/WGI/Chap.5).

### Les températures et les précipitations en Suisse

Les températures et précipitations du passé en Suisse et dans l'arc alpin ont fait l'objet de plusieurs reconstitutions à résolution annuelle (fig. 1.6). Elles sont basées sur d'anciennes mesures instrumentales, des documents historiques, les anneaux de croissance des arbres, des sédiments lacustres et d'autres sources (Pfister 1999; Casty et al. 2005; Büntgen et al. 2006; Trachsel et al. 2012). D'après cela, les températures estivales ont augmenté de plus de deux degrés Celsius depuis le maximum du petit âge glaciaire, vers la fin du XVII<sup>e</sup> siècle ; à noter que la plus

grande partie de cette hausse a eu lieu après 1975. Au début du XIX<sup>e</sup> siècle – entre autres à la suite de deux éruptions volcaniques – la température était nettement au-dessous du domaine de variation des 330 dernières années. Par contre, pendant les derniers 25 ans, notamment pendant les étés 2003 et 2015, elle a été clairement au-dessus de la bande de variation antérieure. En comparaison du siècle dernier, il est frappant de constater l'absence totale d'été froids depuis 1980.

Les précipitations estivales varient sensiblement d'une année à l'autre. Elles sont aussi l'objet de fluctuations sur plusieurs années. Mais elles ne présentent pas de changements à long terme.

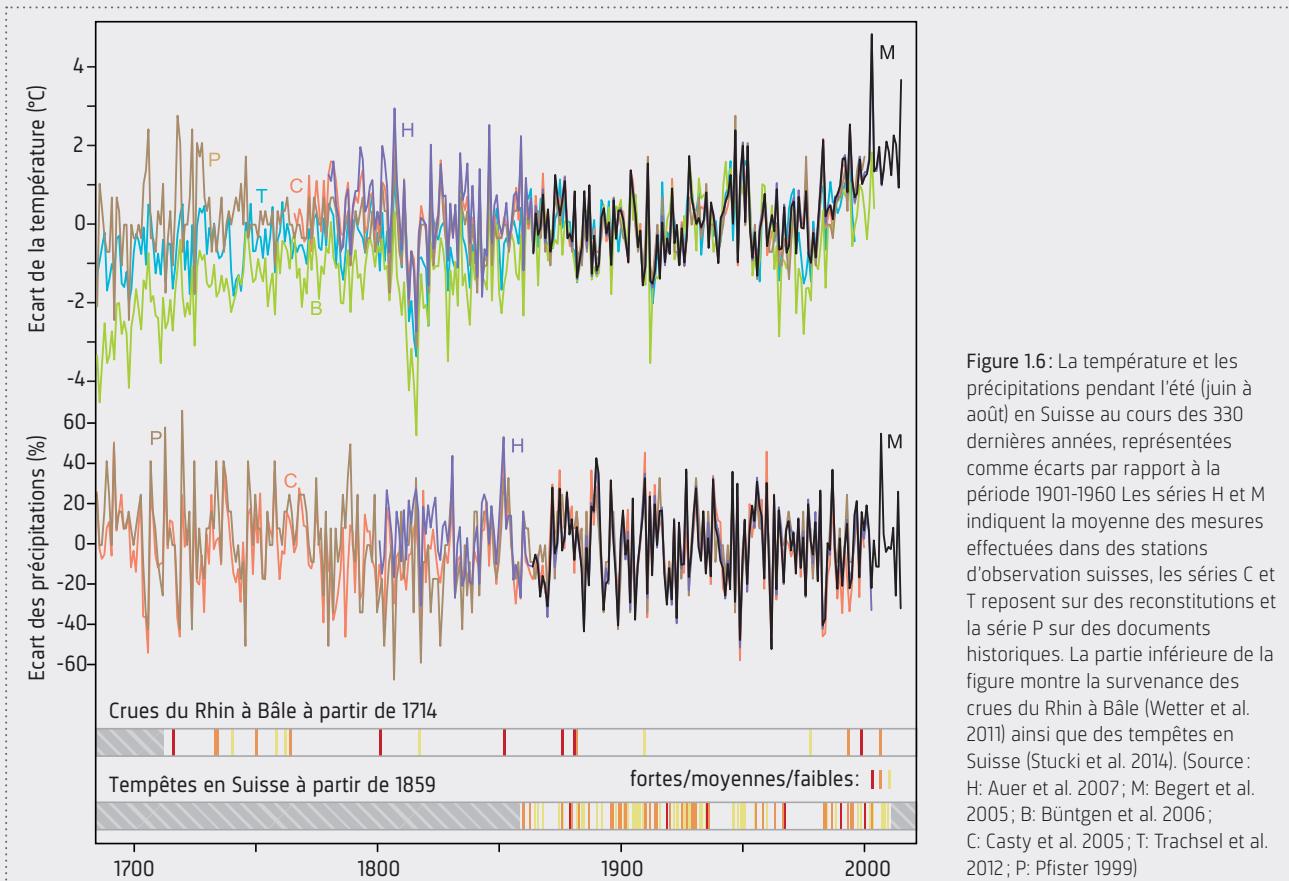
### Événements extrêmes en Suisse

Des extrêmes météorologiques, tels que les jours caniculaires, ont augmenté en Suisse depuis le début des mesures (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52). Mais la fréquence d'événements comme les crues et les tempêtes, que des documents historiques et d'anciennes mesures permettent de reconstituer plus loin



Figure 1.5: La crue de 1852 à Bâle : de tels documents historiques servent de base pour étudier la fréquence des crues dans le passé (Wetter et al. 2011). [Source: Staatsarchiv Basel-Stadt, BILD 13, 323]

<sup>1</sup> Cf. Indications de probabilité du GIEC, p. 22



dans le passé (fig. 1.6; Wetter et al. 2011; Stucki et al. 2014), présente d'importantes fluctuations sur plusieurs décennies. Dans le passé, il y a toujours eu des phases pendant lesquelles les crues et les tempêtes sont rares ; et il y en eu d'autres au cours desquelles ces événements se sont produits plus souvent. Ce dernier cas s'est présenté par exemple vers la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et depuis les années 1980. Entre environ 1935 et 1985, les crues et les tempêtes ont été en revanche peu nombreuses. La mise en évidence de ce phénomène, appelé « disaster gap » (Pfister 2009), a influencé les mesures de gestion des catastrophes naturelles en Suisse.

## Bibliographie

- Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungerböck M, Matulla C, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E (2007) HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. International Journal of Climatology 27: 17–46.
- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005) Homogeneous Temperature and Precipitation Series of Switzerland from 1864 to 2000. International Journal of Climatology 25: 65–80.
- Büntgen U, Frank DC, Nievergelt D, Esper J (2006) Alpine summer temperature variations in the European Alps, AD 755–2004. Journal of Climate 19: 5606–5623.
- Casty C, Handorf D, Sempf M (2005) Combined winter climate regimes over the North Atlantic/European sector 1766–2000. Geophysical Research Letters 32: L13801.
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI). Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI). Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Pfister C (1999) *Wetternachbericht. 500 Jahre Klimavariationen und Naturkatastrophen*. Haupt Verlag, Bern.
- Pfister C (2009) The «Disaster Gap» of the 20th Century and the Loss of Traditional Disaster Memory. GAIA 18: 239–246.
- Stucki P, Brönnimann S, Martius O, Welker C, Imhof M, Wattenwyl N von, Philipp N (2014) A catalog of high-impact windstorms in Switzerland since 1859. Natural Hazards and Earth System Sciences 14: 2867–2882.
- Trachsel M, Kamenik C, Grosjean M, McCarroll D, Moberg A, Brázil R, Büntgen U, Dobrovolský P, Esper J, Frank DC, Friedrich M, Glaser R, Larocque-Tobler I, Nicolussi K, Riemann D (2012) Multi-archive summer temperature reconstruction for the European Alps. AD 1053–1996. Quaternary Science Reviews 46: 66–79.
- Wetter O, Pfister C, Weingartner R, Luterbacher J, Reist T, Trösch J (2011) The largest floods in the High Rhine basin since 1268 assessed from documentary and instrumental evidence. Hydrological Sciences Journal 56: 733–758.

## 1.3 La variabilité climatique : les fluctuations à court terme du climat

**Des fluctuations naturelles à court terme du climat, difficiles à prévoir, se superposent au changement climatique anthropique à long terme. Cette variabilité naturelle, sur des années à des décennies, est en grande partie responsable de l'incertitude des prévisions portant sur des lieux précis, sur de courtes périodes et surtout sur les variables du cycle hydrologique et sur les événements extrêmes. Cette incertitude due à la variabilité naturelle continuera d'exister, mais deviendra toujours plus petite par rapport aux changements anthropiques grandissants.**

*Reto Knutti (EPF de Zurich)*

### Météo versus climat

Les situations météorologiques ne peuvent être clairement prévues que quelques jours à l'avance. La raison à cela est que l'atmosphère est chaotique. Cela signifie que de très petites incertitudes dans les modèles ou les mesures utilisés pour les prévisions météorologiques croissent ; il n'est alors pas possible d'anticiper à long terme, par exemple, la succession exacte des zones de haute et de basse pression ou des périodes ensoleillées et pluvieuses. On peut cependant établir la statistique météorologique et déterminer les changements qu'elle subira à l'avenir. Aucun doute, par exemple, que l'été à Rome est plus chaud et plus sec qu'à Hambourg, même s'il n'est pas possible de prévoir le temps qu'il fera à Hambourg un jour donné de l'année suivante. Les prévisions climatiques, c'est-à-dire de la statistique météorologique, se basent sur les données portant sur la température moyenne, sur la fréquence des jours de canicules ou de neige, mais pas sur le temps qu'il fera à une date précise.

### La variabilité climatique fait partie de l'incertitude

Néanmoins, la météo et, à plus grande échelle de temps, le couplage entre l'atmosphère et l'océan sont importants dans le contexte du changement climatique. La variabilité à court terme (la météo), qui ne peut pas être prévue pour les années et décennies à venir, se superpose au changement anthropique à long terme. À longue échéance (plus de dix ans) et en moyenne sur de grands continents, la contribution de la variabilité à court terme est faible. Celle-ci constitue cependant une grande partie de l'incertitude en matière de prévisions portant sur des lieux précis, de courtes périodes, le cycle hydrologique et les événements extrêmes.

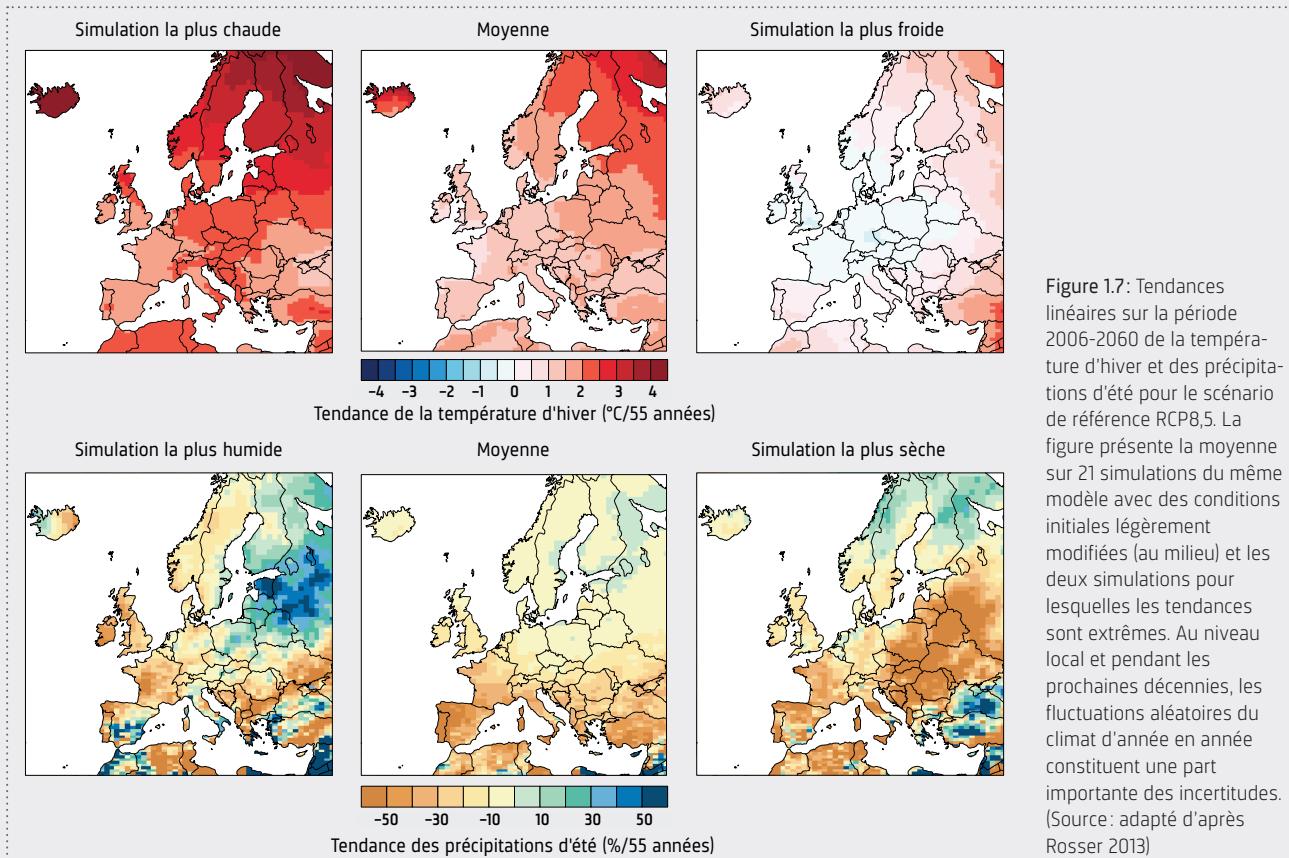
### Défis pour la modélisation du climat

C'est pourquoi la variabilité climatique est un défi tant pour l'attribution de tendances passées au changement climatique anthropique que pour la prévision du climat local au cours des prochaines décennies. Par exemple, les précipitations extrêmes en un lieu donné peuvent diminuer plusieurs décennies de suite et augmenter de nouveau plus tard sans qu'il y ait une raison externe à cela, c'est-à-dire sans autre cause que la variabilité naturelle. L'affaiblissement du réchauffement pendant la période de 1998 à 2013 s'explique en partie par des variations aléatoires dans le Pacifique tropical. De même, une partie de la forte diminution de la banquise dans l'Arctique et l'accumulation d'hivers froids dans l'hémisphère Nord au cours des dernières années sont probablement un hasard, c'est-à-dire des manifestations tenant uniquement à la variabilité naturelle de l'atmosphère.

En revanche, l'augmentation de la température globale tout au long du siècle, la diminution à long terme de la banquise arctique et les changements du cycle hydrologique global sont bien plus grands que la variabilité naturelle attendue et sont attribuables à l'homme. Les tendances observées doivent donc toujours être considérées dans le contexte de la variabilité naturelle de la valeur correspondante avant de tirer des conclusions au sujet de leurs causes. La variabilité naturelle au cours du XX<sup>e</sup> siècle est également bien visible dans des reconstitutions du climat et des séries de mesures (cf. chap. 1.2 Le climat du passé, p. 32).

### L'avenir du climat : l'impact humain dépasse la variabilité naturelle

En ce qui concerne l'avenir, la variabilité climatique implique que la moyenne de plusieurs simulations de modèles climatiques ne représente qu'une meilleure estimation de l'influence de l'homme, du soleil, des volcans etc. Des fluctuations à court terme, difficilement prévisibles, se superposent à cette influence externe. La figure 1.7 il-



lustrer ceci en prenant pour exemple un modèle climatique régional de l'Europe : il a simulé les prochaines décennies à vingt-et-une reprises avec, chaque fois, des conditions initiales légèrement modifiées et, de ce fait, une autre succession de situations météorologiques quotidiennes. Le modèle et le scénario (et donc les impulsions externes) sont identiques ; les écarts ne tiennent ainsi qu'à la variabilité interne.

La figure 1.7 montre le changement attendu de la température d'hiver comme tendance de 2006 à 2060 (meilleure estimation, moyenne des simulations) et la plus chaude et la plus froide des simulations, ainsi que la tendance des précipitations d'été (meilleure estimation, simulation la plus humide / la plus sèche). Un réchauffement et une diminution des précipitations sont probables sur toute l'Europe, mais en certains endroits, les tendances effectives s'écartent nettement du changement attendu. Cela tient en majeure partie à la succession non prévisible de situations météorologiques et non pas à des erreurs dans les modèles climatiques.

Alors que des améliorations des modèles climatiques peuvent en principe réduire les incertitudes qu'ils comportent, la contribution de la variabilité naturelle à l'in-

certitude restera à peu près constante en chiffres absolus – comparée à la part anthropique grandissante, elle deviendra proportionnellement toujours plus petite.

## Bibliographie

- Deser C, Knutti R, Solomon S, Phillips AS (2012) **Communication of the role of natural variability in future North American climate**. *Nature Climate Change* 2: 775–779.
- Fischer EM, Beyerle U, Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes**. *Nature Climate Change* 3: 1033–1038.
- Hawkins E, Sutton R (2009) **The potential to narrow uncertainty in regional climate predictions**. *Bulletin of the American Meteorological Society* 90: 1095–1107.
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Rosser S (2013) **Limits of regional predictability due to internal variability**. Master thesis, Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Switzerland.

## 1.4 Les modèles climatiques

Des modèles informatiques sont utilisés lorsqu'il n'est pas possible d'effectuer des expériences ciblées ou que celles-ci sont trop chères ou pas acceptables. Dans la recherche en climatologie, les modèles sont la seule possibilité de se prononcer quantitativement sur le climat des décennies à venir. On recourt également à des modèles pour comprendre des processus, simuler le climat du passé et clarifier le rôle de l'homme dans le changement climatique. Vu l'énorme puissance de calcul qu'ils requièrent, les modèles climatiques sont toujours, malgré le recours à des ordinateurs les plus performants, un compromis entre la résolution spatiale, la complexité des processus décrits et le nombre de simulations.

Reto Knutti (EPF de Zurich)

Les modèles climatiques, ou de façon plus générale les modèles du système de la Terre, se fondent sur les principes fondamentaux de physique, chimie, biologie et bio-géochimie. Ils imposent notamment la conservation de la masse, de l'énergie et de l'impulsion, ce qui détermine le mouvement de l'air et de l'eau sur la Terre en rotation. Les principes fondamentaux sont représentés par leurs équations respectives, lesquelles sont alors résolues de façon aussi précise que possible au moyen d'ordinateurs très puissants. A la différence des modèles empiriques ou statistiques qui cherchent des structures dans les données, les modélisations climatiques ont pour priorité la description quantitative des processus.

Toutefois, quelques processus – biologiques par exemple, ou ceux qui se déroulent à petite échelle – doivent être décrits de façon simplifiée, parce qu'ils ne sont pas encore bien compris sur le plan quantitatif ou que la capacité de calcul est insuffisante pour les simuler de manière explicite. A titre d'exemples, on peut citer la formation des nuages ou la croissance des plantes. Pour de tels processus, il existe diverses simplifications plausibles qui ont toutes à peu près le même degré de correspondance avec les observations. La diversité des simplifications possibles est l'une des raisons pour laquelle il existe de nombreux modèles climatiques différents. Une autre raison est que le type adéquat de modèle dépend de la question traitée. C'est ainsi que des modèles idéalisés sont utilisés pour comprendre des processus, ou que des modèles plus simples, mais incluant davantage de composantes du système de la Terre (par exemple les inlandsis ou des processus de sédimentation), servent à effectuer des simulations sur de longues périodes dans le passé.

### Les modèles climatiques exigent d'énormes capacités de calcul

Quelques processus, tels que la simulation de systèmes météorologiques, sont décrits de façon plus précise, c'est-à-dire à résolution spatiale plus élevée (réseau à mailles fines). La figure 1.8 montre des simulations pour des résolutions horizontales d'environ 200, 100 et 10 kilomètres. Des zones de haute et de basse pression et des régions de précipitations sont visibles dans les trois cas; mais il va sans dire que les résolutions élevées sont mieux adaptées aux prévisions à petite échelle. Elles décrivent les nuages de façon plus réaliste et tiennent compte par exemple de la topographie des Alpes. Cependant, la simulation pour une résolution de 10 kilomètres nécessite une capacité de calcul mille fois plus grande que pour une résolution de 200 kilomètres (cf. fig. 1.8, en haut). C'est pourquoi les simulations sont toujours, même avec les plus puissants ordinateurs, un compromis entre la résolution spatiale, la complexité des processus décrits, le nombre et la longueur des simulations ainsi que la taille du domaine de calcul.

### Différents facteurs influencent la qualité des prévisions

Actuellement, les simulations globales pour les cent prochaines années ont le plus souvent une résolution de 100 à 200 kilomètres. Les modèles climatiques régionaux, qui ne simulent que l'Europe et sont amorcés à leurs frontières par des données issues d'un modèle global, ont pour la plupart une résolution de 12 ou 25 kilomètres. Pour réaliser des projections climatiques régionales proches de la réalité, il faut presque toujours faire appel aussi bien à des simulations globales que régionales.

Affiner encore davantage les modèles présente un intérêt du point de vue scientifique. Des travaux sont en cours pour calculer explicitement les pluies d'orages et les inté-



**Figure 1.8:** De façon similaire à un capteur photographique doté de davantage de pixels, un modèle climatique résout des structures météorologiques d'autant plus fines qu'il opère dans un réseau à mailles plus serrées. Ceci implique toutefois une augmentation massive du volume de calcul. Les images sont des instantanés de la répartition simulée des nuages (en blanc) et des précipitations (en violet) pour des résolutions de deux degrés (environ 200 km), un degré (env. 100 km) et un huitième degré (env. 10 km). Modèle: NCAR CSEM. Surface du sol: NASA Blue Marble Next Generation. (Source: EPF de Zurich/NASA [[vimeo.com/climatesciencevisuals](https://vimeo.com/climatesciencevisuals)])

ractions qui leur sont associées (comme cela est déjà possible aujourd'hui pour les prévisions météorologiques).

En plus de la résolution horizontale, de nombreux autres facteurs influencent la qualité des modèles. Dans les modèles globaux, un rôle central revient notamment aux interactions avec d'autres composantes du système climatique – les océans, la banquise, la surface des terres, le pergélisol, la chimie atmosphérique, les écosystèmes terrestres et marins ainsi que les cycles biogéochimiques.

### La gestion des incertitudes

Les projections climatiques sont des prévisions quantitatives sur le climat futur pour des scénarios d'émission donnés, c'est-à-dire pour différentes hypothèses au sujet des développements futurs possibles de la société, de l'économie et de la technique. Le choix de ces scénarios d'émission (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38), les simplifications dans les modèles et la variabilité interne du climat sont des causes d'incertitudes en matière de prévisions climatiques. La part d'incertitude des modèles peut être évaluée – comme cela est fait dans le présent rapport – en comparant plusieurs modèles climatiques existants. L'estimation tirée de cette comparaison est une combinaison entre l'incertitude des modèles et la variabilité naturelle. L'incertitude due à la seule variabilité naturelle peut être déterminée en effectuant plusieurs simulations avec le même modèle pour des conditions initiales légèrement différentes (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique : les fluctuations à court terme du climat, p. 34).

## 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre

Il n'est guère possible de prévoir comment la technique, l'économie, la société et ses valeurs et la politique se développeront, ni comment l'homme réagira au changement climatique. C'est pourquoi la recherche fait appel à des scénarios. Ils permettent de déterminer et comparer différentes évolutions des émissions de gaz à effet de serre et leurs impacts sur le climat et la société. Pour chacun de ces scénarios, il est également possible de calculer le forçage radiatif total qui caractérise l'ampleur de l'atteinte humaine au système climatique.

*Reto Knutti (EPF de Zurich), Joeri Rogelj (IIASA Laxenburg)*

Les méthodes des sciences naturelles ne sont pas en mesure de prévoir comment l'homme réagira au changement climatique. Il est tout aussi difficile de faire des prévisions au sujet des développements techniques et de leur diffusion, des mesures politiques ou des accords internationaux. Pour tenir compte de ces incertitudes, on recourt à des scénarios. Ils permettent de déterminer et de comparer différentes évolutions des émissions de gaz à effet de serre et leurs impacts sur le climat et sur la société.

Les scénarios devraient se distinguer autant que possible les uns des autres – mais chacun d'eux doit être plausible et décrire une évolution cohérente des décisions politiques, du progrès technique, de la croissance démographique, de la consommation d'énergie et du développement économique.

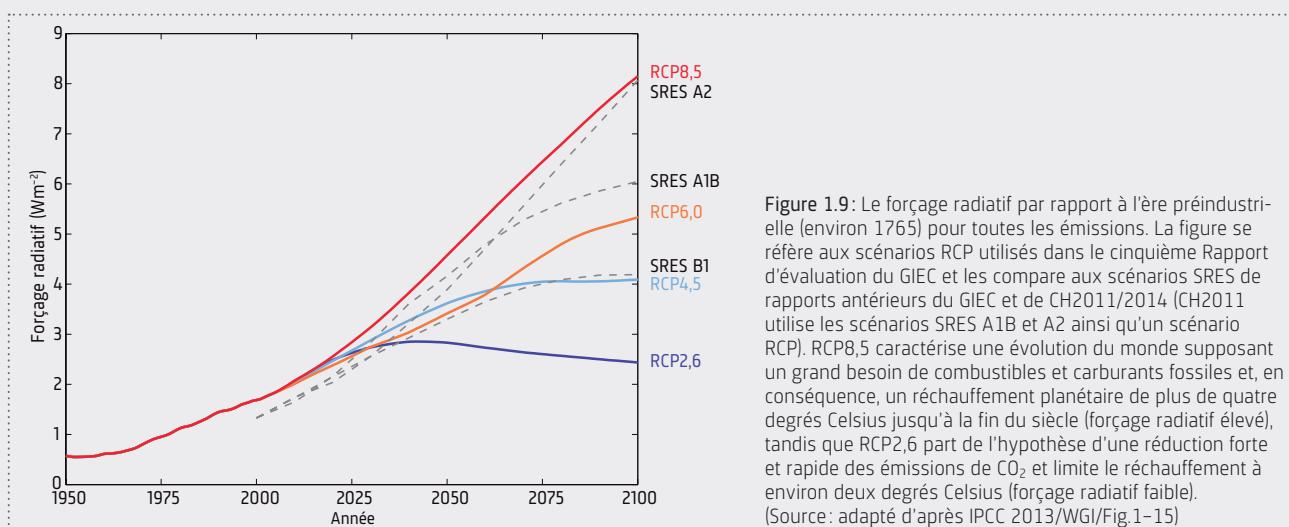
Les scénarios sont calculés au moyen de modèles dits d'évaluation intégrés (MEI), qui décrivent entre autres le système énergétique, la technique, le commerce et l'agriculture. Ces modèles ont recours à des hypothèses, par exemple au sujet de l'inertie de l'économie et du développement social et technique. Les trajectoires de l'évolu-

tion mondiale les plus favorables en termes de coûts sont alors déterminées pour des scénarios à faibles et à fortes émissions.

### Les scénarios : « qu'en serait-il si ... »

Les scénarios sans mesures explicites de protection du climat sont souvent appelés **scénarios de référence** – ceci ne signifiant pas que tout reste dans l'état actuel. Les scénarios de référence peuvent admettre, par exemple, des améliorations de l'efficacité énergétique et une augmentation sensible de la production d'énergie sans émissions de CO<sub>2</sub>, pour autant que cela soit économiquement rentable. Les améliorations de l'efficacité et la croissance des énergies renouvelables ne résultent pas systématiquement de mesures politiques de protection du climat ; de nombreux développements techniques, par exemple, sont motivés par les forces du marché, parce qu'ils permettent de gagner de l'argent.

Par contre, les **scénarios d'atténuation** exigent une limitation du changement climatique. Le MEI détermine alors la tra-



| Scénario   | Scénario RCP       | Caractéristiques   | Trajectoire d'évolution   | Scénarios SRES correspondants   |
|--|--------------------|--|---|---|
| Scénario sans mesures explicites de protection du climat (scénario de référence) | RCP8,5             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de mesures explicites de protection du climat.</li> <li>Amélioration de l'efficacité énergétique et augmentation de la production d'énergie sans émission de CO<sub>2</sub> si économiquement rentable.</li> </ul>  | croissante <ul style="list-style-type: none"> <li>Réchauffement en 2100 de 4-5 degrés Celsius par rapport au niveau préindustriel.</li> <li>Forçage radiatif de 8,5 W/m<sup>2</sup> en 2100</li> <li>Equivalent de CO<sub>2</sub>: 1370 ppm</li> </ul>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>SRES-A1F1</li> <li>SRES-A1B et SRES-A2: également des scénarios à fortes émissions de CO<sub>2</sub>, inférieures toutefois à celles des scénarios SRES-A1F1 et RCP8,5, mais bien au-dessus de celles du scénario de stabilisation.</li> </ul> |
| Scénario avec faible réduction des émissions (scénario de stabilisation)         | RCP4,5             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Réduction des émissions de gaz à effet de serre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle, mais insuffisante pour stabiliser l'augmentation globale de la température avant 2100</li> </ul>  | croissante <ul style="list-style-type: none"> <li>Réchauffement en 2100 de ~2,5 °C par rapport au niveau préindustriel</li> <li>Forçage radiatif de 4,5 W/m<sup>2</sup> en 2100</li> <li>Equivalent de CO<sub>2</sub>: 650 ppm</li> </ul>   | <ul style="list-style-type: none"> <li>SRES-B1 est très semblable si l'on considère l'évolution du réchauffement jusqu'en 2100.</li> </ul>  |
| Scénario avec forte réduction des émissions (scénario d'atténuation)             | RCP2,6 (ou RCP3PD) | <ul style="list-style-type: none"> <li>Forte réduction des émissions de gaz à effet de serre au cours du XXI<sup>e</sup> siècle</li> <li>Amélioration marquée de l'efficacité énergétique et augmentation substantielle de la production d'énergie sans émission de CO<sub>2</sub>, sans mettre en danger la croissance économique.</li> </ul> | pic puis recul <ul style="list-style-type: none"> <li>Réchauffement en 2100 de ~1,5 °C par rapport au niveau préindustriel</li> <li>Forçage radiatif de 3 W/m<sup>2</sup> avant 2100 et diminuant ensuite à 2,6 W/m<sup>2</sup> jusqu'en 2100</li> <li>Equivalent de CO<sub>2</sub>: 490 ppm</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de scénario SRES comparable à disposition.</li> </ul>  |

**Tableau 1.1:** La recherche climatologique travaille avec des scénarios pour déterminer et comparer différentes évolutions des émissions de gaz à effet de serre et leurs impacts sur le climat et la société. Le présent rapport discute des scénarios RCP et SRES (par analogie avec les rapports du GIEC sur l'état du savoir). Les scénarios RCP ont été introduits pour le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2013/WGI). Les rapports SRES utilisés antérieurement ne comportent pas encore de mesures de protection du climat. Du point de vue de l'évolution de la température (des équivalents de CO<sub>2</sub>), quelques scénarios RCP actuels peuvent être approximativement assimilés aux anciens scénarios SRES (cf. la dernière colonne du tableau et Rogelj et al. 2012). (Source: adapté d'après Moss et al. 2010)

jectoire d'émissions assurant les coûts les plus bas et le mix de techniques et d'énergies le plus efficace. Il prend en considération que les techniques ne peuvent pas être appliquées aussi vite et aussi largement que l'on veut, que les infrastructures existantes ne peuvent pas être remplacées prématurément sans coûts supplémentaires et que le volume d'investissement ne doit pas être trop important. Plus l'objectif climatique est ambitieux, plus les mesures additionnelles de réduction des émissions de gaz à effet de serre doivent être radicales par rapport au scénario de référence. Les scénarios n'ont pas pour objet d'examiner s'ils sont politiquement possibles ou probables. Ils doivent être interprétés dans le sens de «qu'en serait-il si ...». Ils présentent à la société et aux responsables politiques un choix de développements futurs possibles.

## Le forçage radiatif: l'ampleur de l'atteinte humaine

Partant du développement économique, les modèles d'évaluation intégrés calculent les émissions de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>, méthane, N<sub>2</sub>O, hydrocarbures halogénés et SF<sub>6</sub>), d'aérosols et d'autres polluants atmosphériques. Le forçage radiatif total (le changement du bilan radiatif global) qui en découle caractérise l'ampleur de l'atteinte humaine au système climatique. La figure 1.9 se réfère aux scénarios (appelés RCP: Representative Concentration Pathways) utilisés dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC sur l'état du savoir; le forçage radiatif en

2100 se situe dans une fourchette de 2,6 W/m<sup>2</sup> à 8,5 W/m<sup>2</sup>: plus cette valeur est élevée, plus le changement climatique est fort.

Les scénarios imposent pour l'essentiel les concentrations des gaz recherchées, à partir de quoi les modèles climatiques calculent les réductions nécessaires des émissions (cf. chap. 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain, p. 156). Le type de techniques à utiliser pour abaisser les émissions n'est en revanche pas prescrit. De cette façon, un scénario RCP donné et le changement climatique qui lui est associé peuvent être obtenus au moyen de différentes combinaisons de mesures prises au niveau national et à l'étranger, de diverses techniques et de différents instruments politiques. A titre de comparaison, les scénarios SRES utilisés dans des rapports antérieurs sont également inclus dans la figure; ces derniers ne comportent pas de mesures de protection du climat.

## Bibliographie

IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. [www.ipcc.ch/report/wg1](http://www.ipcc.ch/report/wg1)

Moss RH, Edmond JA, Hibbard KA, Manning MR, Rose SK, van Vuuren DP, Carter TR, Emori S, Kainuma M, Kram T, Meehl GA, Mitchell JFB, Nakicenovic N, Riahi K, Smith SJ, Stouffer RJ, Thomson AM, Weyant JP, Wilbanks TJ (2010) *The next generation of scenarios for climate change research and assessment*. Nature 436: 747–756.

Rogelj J, Meinshausen M, Knutti R (2012) *Global warming under old and new scenarios using IPCC climate sensitivity range estimates*. Nature Climate Change 2: 248–253.

## 1.6 La température

**La Terre se réchauffe et il est extrêmement probable que l'influence humaine est la principale cause du réchauffement observé depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Indépendamment du scénario choisi, les modèles climatiques prévoient que les températures mondiales, continentales et régionales poursuivront leur ascension. En Suisse aussi, les températures moyennes continueront très probablement d'augmenter au cours du XXI<sup>e</sup> siècle dans toutes les régions et pendant toutes les saisons: dans le scénario sans mesures explicites de protection du climat (en abrégé: scénario de référence) SRES-A2, le réchauffement se situe, en moyenne sur l'année, en gros entre trois et cinq degrés Celsius; dans le scénario comportant une forte réduction des émissions (en abrégé: scénario d'atténuation) RCP2,6, il se limite à un à deux degrés Celsius.**

Gian-Kasper Plattner (Université de Berne, "aujourd'hui au WSL), Andreas M. Fischer (MétéoSuisse), Thomas F. Stocker (Université de Berne)

### Observations au niveau mondial

#### Le réchauffement du système climatique est sans équivoque

La Terre se réchauffe: de 1880 à 2012, la température moyenne mondiale à la surface de la planète a augmenté de 0,85 degrés Celsius (fig. 1.10a, à gauche) (IPCC 2013/WGI/Chap.2). Chacune des trois dernières décennies a été plus chaude que la précédente et que toutes celles qui ont précédé depuis le début de la série de mesures en 1850. Le réchauffement ne se limite pas aux couches d'air proches du sol. La troposphère, la couche inférieure de l'atmosphère terrestre, dans laquelle se déroulent les processus météorologiques s'est globalement réchauffée depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle (IPCC 2013/WGI/Chap.2).

Hormis ce réchauffement à long terme, la température moyenne annuelle mondiale présente des variations annuelles et décennales considérables (fig. 1.10a, à gauche) qui influencent fortement les tendances de réchauffement à court terme.

Pour la période de 1901 à 2012, nous disposons d'assez d'observations pour nous prononcer sur les tendances régionales du réchauffement. Ces données montrent que toute la surface de la Terre s'est réchauffée (fig. 1.10b, à gauche) (IPCC 2013/WGI/Chap.2). Dans la plupart des régions continentales, l'augmentation de la température est plus marquée que sur les océans. Dans l'hémisphère Nord, la période de 1983 à 2012 fut *probablement* la tri-décennie la plus chaude de ces 1400 dernières années (IPCC 2013/WGI/Chap.5); (cf. chap. 1.2 Le climat du passé, p. 32). Depuis environ 1950, on observe également des changements d'intensité et de fréquence des niveaux extrêmes de température (IPCC 2013/WGI/Chap.2; IPCC 2012/SREX/Chap.3) (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52).

### L'influence humaine sur le réchauffement est claire

Selon le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC sur l'état du savoir (IPCC 2013/WGI/Chap.10; IPCC 2013/WGI/SPM), les activités humaines sont responsables d'une grande partie du réchauffement constaté depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle:

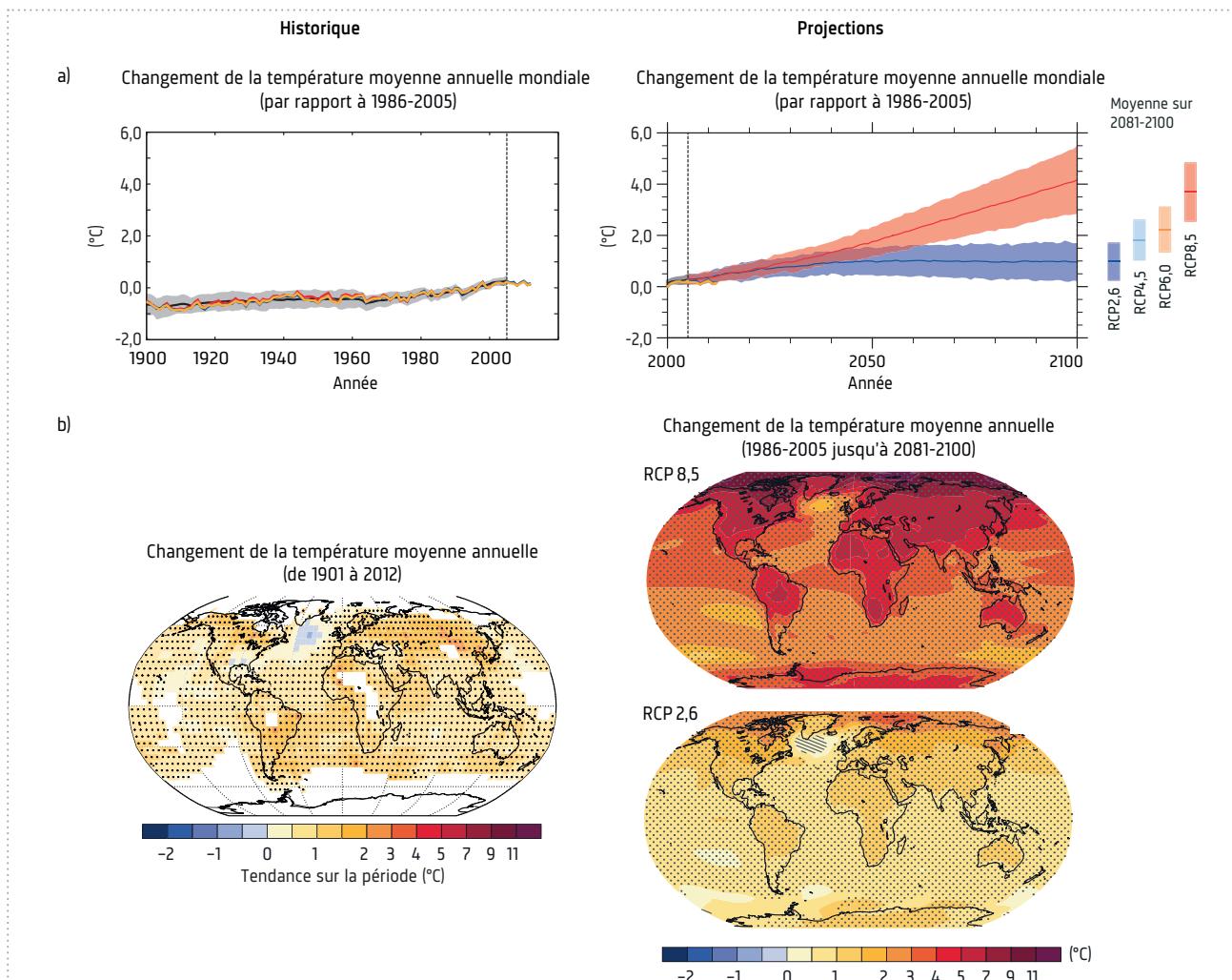
- Au niveau mondial: une grande partie du réchauffement planétaire observé est attribuable à des activités humaines, avant tout à l'émission de gaz à effet de serre, notamment de CO<sub>2</sub>, méthane et protoxyde d'azote, due à la combustion de carburants fossiles ou à des changements de l'utilisation du sol et au déboisement. Aussi est-il *très probable* que l'augmentation anthropique de la concentration des gaz à effet de serre (avant tout de CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère est responsable de plus de la moitié de la croissance de la température mondiale observée de 1951 à 2010.
- Au niveau continental: l'influence humaine sur le réchauffement est démontrée entre-temps sur tous les continents, à l'exception de l'Antarctique. Les activités humaines ont également contribué de façon substantielle au réchauffement de l'Arctique.

D'autres facteurs ont influé sur les températures, par exemple les aérosols, qui ont dans l'ensemble un effet de refroidissement. Des facteurs naturels, comme le soleil ou le volcanisme, ont également un impact; mais en moyenne sur des décennies, leur influence est faible, si bien qu'ils jouent un rôle négligeable dans le réchauffement planétaire mesuré depuis 1951 (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

### Projections au niveau mondial

#### Les émissions de CO<sub>2</sub> sont déterminantes pour l'ampleur du réchauffement

Pour évaluer de possibles développements du climat, on fait tourner des modèles climatiques pour différents scé-



**Figure 1.10:** Changements observés et modélisés de la température de l'air à la surface de la Terre de 1900 à 2100. (a) Evolution des changements de la température moyenne annuelle mondiale. (b) structure spatiale des changements de la température moyenne annuelle. L'augmentation de la température moyenne annuelle mondiale depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle est de presque 0,9 degrés Celsius. Les changements au cours du siècle présent pourraient être de plusieurs fois supérieurs. Le réchauffement à venir dépend fortement de l'évolution future des émissions de gaz à effet de serre. Les valeurs moyennes sur la période de 2081 à 2100 et les incertitudes y relatives sont représentées, pour tous les scénarios RCP, par des lignes horizontales et des barres verticales de couleur. Le réchauffement n'est pas égal dans toutes les régions de la Terre: l'augmentation de la température au-dessus des continents est plus marquée dans la plupart des régions qu'au-dessus des océans. L'augmentation observée de la température, de même que celle prévue par les modélisations, est particulièrement prononcée au-dessus de l'Arctique. Dans les régions en pointillés, les changements sont importants en comparaison de la variabilité naturelle, tandis que dans les zones hachurées, les fluctuations naturelles prédomineront.

(Source: IPCC 2013/WGI/SPM, la figure combine des informations des figures SPM.1, SPM.7 et SPM.8)

narios d'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre et substances ayant une incidence sur le climat (fig. 1.10a/b, à droite) (cf. chap. 1.4 Les modèles climatiques, p. 36). Les scénarios pris en compte dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC sur l'état du savoir (IPCC 2013/WGI/SPM) vont d'un scénario comportant une forte réduction des émissions (en abrégé: scénario d'atténuation), RCP2,6, à un scénario de référence sans mesures explicites de protection du climat (en abrégé: scénario de référence) RCP8,5 (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38). Sauf dans le scénario d'atténuation RCP2,6, le réchauff-

ement depuis le début de l'industrialisation (choisi ici comme moyenne modélisée de 1850 à 1900) jusqu'à la fin du siècle dépassera probablement dans tous les scénarios 1,5 degrés Celsius (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Indépendamment du scénario, des variations internes naturelles dans le système climatique auront, à l'avenir aussi, une influence importante sur le climat, avant tout à court terme et régionalement. A partir du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle, l'ampleur des changements climatiques indiqués par les projections est déterminée principalement par le choix du scénario: en effet, c'est en premier lieu la quantité totale d'émissions de CO<sub>2</sub> qui détermine le développement du

réchauffement planétaire moyen de la surface de la Terre jusqu'à la fin du siècle (IPCC 2013/WGI/Chap.12; IPCC 2013/WGI/TS) (cf. chap. 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain, p. 156).

En ce qui concerne les prochaines décennies (la période 2016-2035 par rapport à 1986-2005), la hausse de la température moyenne annuelle mondiale se situera *probablement* entre 0,3 degrés Celsius et 0,7 degrés Celsius (IPCC 2013/WGI/Chap.11). Ceci dans l'hypothèse qu'il n'y ait pas de grosses éruptions volcaniques ni de changements inattendus de longue durée du rayonnement solaire incident total.

D'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (période 2081-2100 par rapport à 1986-2005), les modèles climatiques prévoient les évolutions *probables* suivantes de la température moyenne annuelle mondiale (IPCC 2013/WGI/Chap.12):<sup>1</sup>

- **scénario d'atténuation RCP2,6**: réchauffement entre 0,3 degrés Celsius et 1,7 degrés Celsius
- **scénario de référence RCP8,5**: réchauffement entre 2,6 degrés Celsius et 4,8 degrés Celsius

Selon tous les scénarios RCP – à l'exception du scénario d'atténuation RCP2,6 – le réchauffement projeté se poursuit au-delà de 2100 (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Même en cas d'arrêt immédiat et complet des émissions de CO<sub>2</sub> mondiales, la température moyenne annuelle mondiale reste alors à peu près constante pendant plusieurs siècles.

Les projections prévoient une croissance générale de la température moyenne annuelle mondiale, cependant le réchauffement sera différent selon les régions (IPCC 2013/WGI/Chap.12; IPCC 2013/WGI/Chap.14). Dans tous les scénarios, la région arctique, par exemple, se réchauffe plus rapidement que la moyenne mondiale, et le réchauffement moyen est en général plus important au-dessus des terres que de la mer.

## Observations se rapportant à la Suisse

### Le réchauffement est sans équivoque

Plus l'espace considéré est petit, plus incertaine est la détermination de la tendance du changement climatique – du fait que la variabilité naturelle est relativement grande. Néanmoins – exactement comme aux échelles planétaire et continentale – les séries de mesures de la température en Suisse ne laissent aucun doute sur le changement climatique en cours : le réchauffement en Suisse est sans équivoque.

Depuis le début des mesures en 1864, la température moyenne annuelle est montée en Suisse d'environ 1,8 degrés Celsius. Ceci correspond à une augmentation moyenne de 0,12 degrés Celsius par décennie (MétéoSuisse 2015). Mais le réchauffement ne s'est pas déroulé de façon linéaire : la température a augmenté beaucoup plus fortement au cours des dernières décennies, en gros de 0,37 degrés Celsius par décennie depuis 1961. Les années avec une température très au-dessus de la moyenne se sont accumulées depuis la fin des années 1980 : des vingt années les plus chaudes depuis le début des relevés en 1864, dix-sept sont survenues depuis 1990. 2015 a été l'année la plus chaude en Suisse depuis le début des mesures relevés. A ceci s'ajoute que la température en Suisse pendant les cinquante dernières années a connu une augmentation en gros 1,6 fois plus importante que la température moyenne sur l'ensemble des terres émergées de l'hémisphère Nord.

Les tendances à long terme de la température, détaillées par région et par saison, sont relativement homogènes et donc semblables à celles de la moyenne annuelle suisse. Toutefois, en raison de la faible étendue géographique, les tendances mesurées ont subi de fortes variations d'une année à l'autre, comme l'illustre l'exemple de la Suisse nord-orientale présenté dans la figure 1.11. L'hiver froid 1962/1963 notamment, ou l'été caniculaire de 2003, sautent aux yeux du fait de températures qui s'écartent de plusieurs degrés de la moyenne à long terme de la période de référence 1980-2009 utilisée ici.

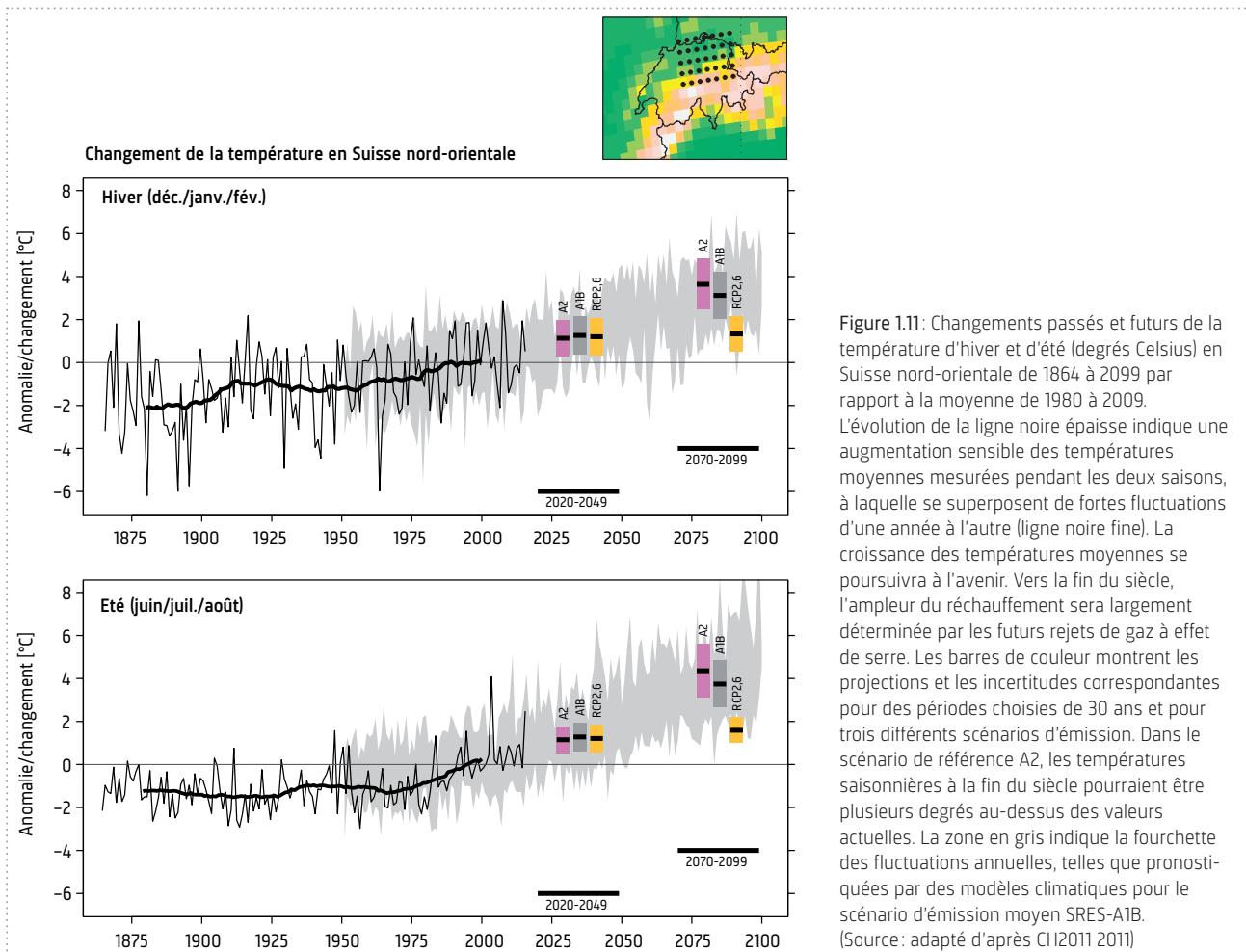
## Projections pour la Suisse

### Des facteurs locaux influencent le climat local

Le climat futur de la Suisse subira d'une part l'influence de tendances régionales et mondiales ; d'autre part, des facteurs locaux joueront un rôle éminent en raison de la complexité de la topographie. Pour tenir compte de ces circonstances, on recourt à des modèles climatiques régionaux à haute résolution. L'évaluation nationale du futur climat de la Suisse « CH2011 » a exploité de nombreux modèles de ce genre (CH2011 2011; Fischer et al. 2015). Ceux-ci montrent que les températures devraient augmenter de façon significative dans l'ensemble de la Suisse au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et s'écartez de l'état actuel et passé. Conjointement à ces changements, il faut compter avec des périodes chaudes et des vagues de chaleur estivales plus intenses et de plus longue durée, tandis que le nombre de journées et de nuits froides en hiver devrait diminuer (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52).

Selon CH2011 (2011), les températures devraient croître un peu plus en été que pendant les autres saisons. Les dif-

<sup>1</sup> Les marges d'incertitude probables d'un scénario donné s'obtiennent en utilisant plusieurs modèles climatiques de sensibilités climatiques différentes.



férences régionales sont plutôt faibles. Mais les modèles indiquent un réchauffement légèrement plus prononcé en altitude et en Suisse méridionale. Les changements de températures diffèrent sensiblement selon la période de prévisions considérée et selon les hypothèses au sujet des futures émissions de gaz à effet de serre. La figure 1.11 met ceci en évidence dans le cas de la Suisse nord-orientale en hiver et en été. Voici, de façon générale, les perspectives pour la Suisse :

- Les futures émissions de gaz à effet de serre influenceront de façon déterminante le climat de la Suisse vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
- Sans efforts internationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les températures moyennes à la fin du siècle seront *très probablement*, pendant toutes les saisons, de plusieurs degrés supérieures à la moyenne à long terme de 1980 à 2009 (cf. les barres violettes dans l'exemple de la Suisse nord-orientale). En moyenne annuelle, les projections des modèles pour le scénario de référence SRES-A2 indiquent, pour l'ensemble de la Suisse, un réchauffement situé entre 2,9 et 5,1 degrés Celsius.

- Même si l'on parvient, au niveau international, à réduire fortement les émissions, comme supposé dans le scénario d'atténuation RCP2,6, il faudra compter en Suisse avec un réchauffement supplémentaire de 1,0 à 1,9 degrés Celsius de la moyenne annuelle d'ici la fin du siècle – c'est à peu près autant que depuis le commencement des mesures de températures dans ce pays en 1864.

- Pour le proche avenir (jusqu'au milieu du siècle), les changements de température projetés sont semblables pour les deux scénarios (cf. les barres de couleur dans la fig. 1.11); ils se situent entre 0,8 et 1,6 degrés Celsius. Les raisons de cette similitude des projections s'expliquent, d'une part, par le fait que jusqu'au milieu du siècle les scénarios relatifs à la quantité totale d'émissions ne diffèrent pas encore beaucoup et, d'autre part, que le système climatique réagit avec retard.

Les changements des températures mentionnés ici s'appliquent à des moyennes calculées sur 30 ans. Ils informent donc sur une moyenne à long terme. Des écarts annuels positifs et négatifs autour de cette moyenne continueront d'être partie intégrante du climat futur. La figure

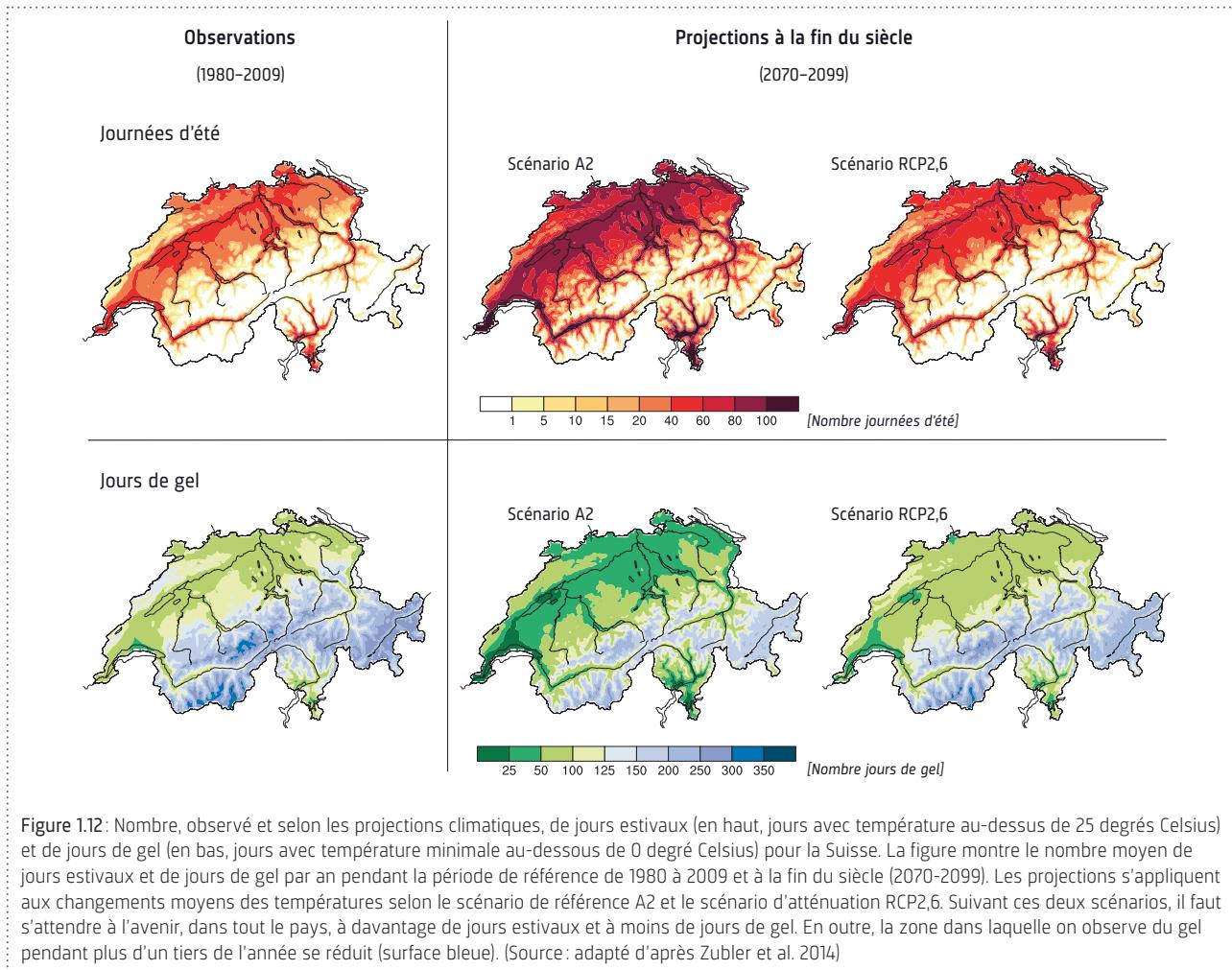


Figure 1.12: Nombre, observé et selon les projections climatiques, de jours estivaux (en haut, jours avec température au-dessus de 25 degrés Celsius) et de jours de gel (en bas, jours avec température minimale au-dessous de 0 degré Celsius) pour la Suisse. La figure montre le nombre moyen de jours estivaux et de jours de gel par an pendant la période de référence de 1980 à 2009 et à la fin du siècle (2070-2099). Les projections s'appliquent aux changements moyens des températures selon le scénario de référence A2 et le scénario d'atténuation RCP2,6. Suivant ces deux scénarios, il faut s'attendre à l'avenir, dans tout le pays, à davantage de jours estivaux et à moins de jours de gel. En outre, la zone dans laquelle on observe du gel pendant plus d'un tiers de l'année se réduit (surface bleue). (Source: adapté d'après Zubler et al. 2014)

1.11 illustre ceci par les fluctuations d'une année à l'autre apparaissant dans les simulations du climat (zone grise en arrière-plan).

### Températures en hausse: davantage de jours estivaux, moins de jours de gel

Pour donner une idée plus concrète des changements de la température, différents indicateurs climatiques ont été évalués (Zubler et al. 2014). Il est apparu, par exemple, qu'un changement moyen de la température de 4,0 degrés Celsius à la fin du siècle selon le scénario de référence SRES-A2 signifie deux fois plus de jours estivaux sur le Plateau (des jours pendant lesquels la température maximale est supérieure à 25 degrés Celsius): de 30-50 aujourd'hui, le nombre de jours estivaux par année passe alors à 60-100 (fig. 1.12). Dans le cas du scénario d'atténuation RCP2,6, où le changement moyen est de 1,5 degrés Celsius, le nombre futur de jours estivaux est nettement plus bas, entre 50 et 70 par année.

Avec l'augmentation de la température, il faut également s'attendre à un recul prononcé des jours de gel: en plaine, dans le scénario de référence SRES-A2, leur nombre passe de 80 environ aujourd'hui à 10-40; dans l'arc alpin, selon ce même scénario, il faut compter avec une réduction des jours de gel allant jusqu'à 50 pour cent. Ceci signifie que dans certaines parties des Alpes, il y aurait moins de 120 jours au cours desquels la température descendrait au-dessous de 0 degrés Celsius (surface bleue dans la fig. 1.12). Comme pour le nombre de jours estivaux, ces effets sont beaucoup moins prononcés pour le scénario d'atténuation RCP2,6.

### Défis pour la recherche climatique

L'appréciation des changements climatiques passés et futurs doit prendre en compte le rôle important que jouent les fluctuations naturelles du climat. Elles sont provoquées notamment par la variabilité du soleil, par des éruptions volcaniques ou par des variations dans la circulation océanique

(El Niño, par exemple, peut causer des fluctuations des températures à la surface de la mer, dans le Pacifique tropical). Les variations qui en résultent dans les circulations atmosphériques peuvent influencer la température au niveau planétaire et régional pendant plusieurs années, voire décennies, et se superposer aux tendances à long terme. C'est pourquoi des courtes séries temporelles de la température ne permettent pas d'estimer les tendances à long terme du climat. Par exemple, la vitesse du réchauffement au cours des années 1998 à 2012 est de 0,05 degrés Celsius par décennie. Elle est nettement inférieure à celle de 0,12 degrés Celsius par décennie, calculée pour la période de 1951 à 2012 (IPCC 2013/WGI/Chap.2; IPCC 2013/WGI/SPM).

Les tendances tirées de séries de courte durée dépendent fortement de la fenêtre temporelle considérée: au niveau mondial, 1998 fut une année plus chaude que la normale (ce qui tenait à un fort événement El Niño); c'est pourquoi une tendance basse pour les années de 1998 à 2012 n'étonne pas. La variabilité naturelle du climat est d'une grande importance à l'échelle d'une dizaine d'années. Pour cette raison, d'importants efforts ont été entrepris ces dernières années pour comprendre et quantifier la variabilité naturelle du climat de façon plus précise. Pour l'avenir proche, les fluctuations naturelles sont l'une des principales causes d'incertitudes des projections climatiques au niveau mondial et régional. On attend à ce sujet un important gain de connaissances grâce à des modèles de simulation qui tiennent compte de l'état initial des océans à l'époque actuelle (IPCC 2013/WGI/Chap.11). De telles simulations contribuent largement à une meilleure compréhension des fluctuations naturelles du climat à l'échelle saisonnière et décennale et aident à déterminer et à vérifier leur prévisibilité. Pour les projections dans l'avenir lointain, les incertitudes tenant aux différents scénarios et modèles jouent un rôle plus important que les fluctuations naturelles du climat (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

## Le réseau de mesure suisse: une couverture spatiale et temporelle hors du commun

Les modèles climatiques actuels sont souvent à mailles trop grossières pour reproduire des processus à petite échelle, tels que l'influence de la topographie des montagnes sur les courants éoliens ou sur les processus locaux d'échange entre le sol et l'atmosphère. Des effets de ce genre sont décrits par les modèles de façon simplifiée, sur la base de données semi-empiriques. La forme de la description varie de modèle en modèle et est l'une des causes principales des divergences entre les projections climatiques obtenues par différents modèles pour un même scénario. Une façon courante de prendre en considération ces incertitudes dans les projections climatiques est d'exploiter en parallèle un grand nombre de modèles climatiques.

Des mesures de haute qualité de la température (par satellites, à partir de ballons et au sol) au cours de périodes aussi longues que possible sont essentielles pour calibrer et développer de meilleurs modèles climatiques et pour évaluer des évolutions à long terme. Cependant, la couverture spatiale et temporelle des mesures au sol et dans l'atmosphère n'est pas suffisante dans toutes les parties du monde où leur qualité est médiocre en raison d'inhomogénéités ou d'erreurs de mesure systématiques. La Suisse dispose à cet égard d'une base hors du commun, grâce au réseau de mesure de MétéoSuisse: dans plus de vingt-cinq stations au sol, les séries homogénéisées de mesures de la température remontent jusqu'à 1900 et en partie même jusqu'au milieu du XIX<sup>e</sup> siècle (Begert et al. 2005).

## Bibliographie

- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005) *Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000*. International Journal of Climatology, 25: 65–80.
- CH2011 (2011) *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fischer AM, Liniger MA, Appenzeller C (2015) *Climate scenarios of seasonal means: extensions in time and space*. CH2011 Extension Series No. 2, Zurich, 18 pp.
- IPCC (2012) Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX). Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 10 «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Chapter 14 «Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Technical Summary (TS). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- MétéoSuisse (2015) *Rapport climatologique 2014*. Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), Zurich, 80 pp.
- Zubler EM, Scherrer SC, Croci-Maspoli M, Liniger MA, Appenzeller C (2014) *Key climate indices in Switzerland: expected changes in a future climate*. Climatic Change 123: 255–271.

## 1.7 Le cycle hydrologique

**Le réchauffement planétaire de l'atmosphère influence le cycle hydrologique de façon déterminante : le fait que ce dernier s'accélère et que la teneur en eau de l'atmosphère s'accroît se manifeste par une augmentation des précipitations et de l'évaporation globale. Ces changements suivent des schémas géographiques et saisonniers spécifiques qui apparaissent de plus en plus clairement au fur et à mesure que le climat se réchauffe. Jusqu'à la fin du siècle, les précipitations augmenteront au nord de l'Europe et diminueront au sud du continent. La Suisse se trouve dans la région de transition entre ces deux zones. Les changements en matière de précipitations sont déterminés essentiellement par cette évolution à grande échelle. Les modèles climatiques projettent une baisse des précipitations moyennes en été dans l'ensemble de la Suisse et leur hausse pendant les autres saisons dans certaines parties du pays ; toutefois, des fluctuations naturelles à court et moyen terme se superposeront à ces tendances et prédomineront pendant quelques décennies. L'ampleur de ces changements jusqu'à la fin du siècle dépendra fortement de la pollution future par les gaz à effet de serre et par les aérosols (poussière fine).**

*Christoph Schär (EPF de Zurich), Andreas M. Fischer (MétéoSuisse)*

### Observations au niveau mondial

De nombreux travaux théoriques démontrent depuis longtemps que le réchauffement planétaire de l'atmosphère influence le cycle hydrologique de façon déterminante. Il faut s'attendre notamment, parallèlement au réchauffement, à une augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère et à une accélération de tout le cycle hydrologique (hausse des précipitations et de l'évaporation globale). Cependant, ces changements ne se font pas de manière continue mais suivent des schémas géographiques et saisonniers spécifiques.

### La teneur en eau de l'atmosphère a augmenté

Les observations à partir de stations au sol et de ballons météorologiques correspondent bien à ces prévisions : elles indiquent une hausse significative de la teneur absolue<sup>1</sup> en eau de l'atmosphère depuis 1970, aussi bien au-dessus des terres que des océans. Ces observations concordent avec l'effet Clausius-Clapeyron qui dit que l'humidité absolue croît de six à sept pour cent par degré Celsius de réchauffement. En moyenne mondiale, la teneur en eau de l'atmosphère dépend aussi fortement de la variabilité naturelle et de la température considérées à grande échelle (p. ex. impact d'El Niño). Pendant les phases de faible réchauffement, l'augmentation de la teneur en eau de l'atmosphère est moins élevée et statistiquement non significative (comme ce fut le cas pendant la période de 2000 à 2012).

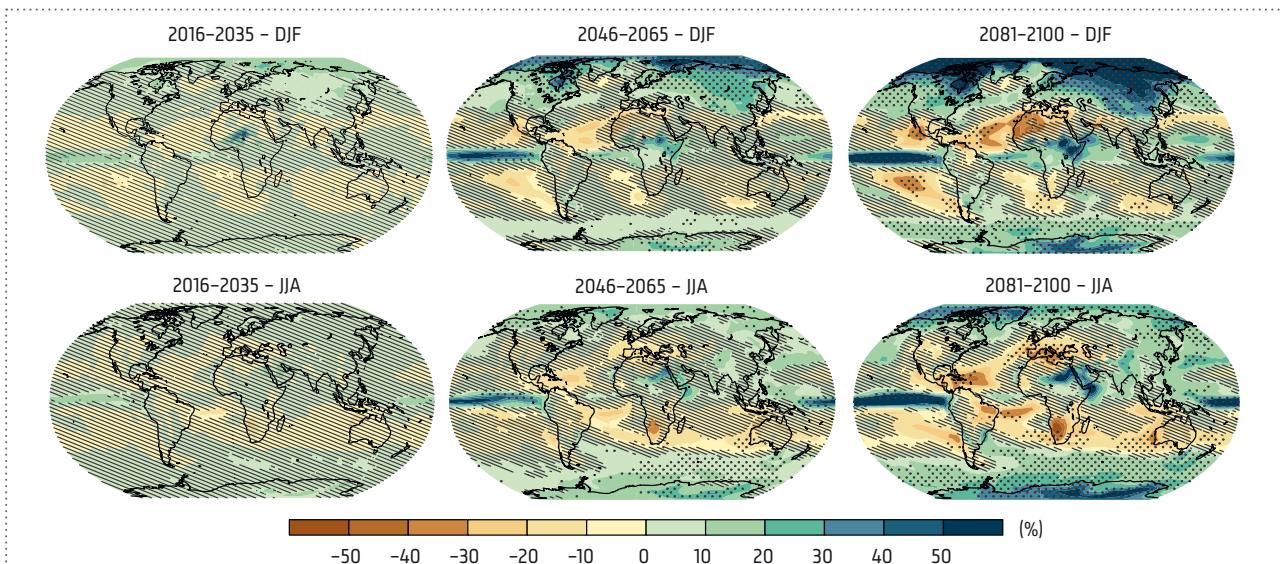
De nombreuses études à grande échelle sur les précipitations aux latitudes moyennes et hautes de l'hémisphère Nord indiquent une tendance à la hausse pendant les dernières décennies. Un signal statistiquement significatif atteste une telle évolution sur les terres émergées des latitudes septentrionales moyennes (30-60 degrés nord) pendant les 50 à 100 dernières années. Dans de nombreuses autres régions, les tendances sont moins claires ou se contredisent d'une étude ou d'une série de données à l'autre.

L'évaporation évolue en moyenne mondiale parallèlement aux précipitations, car la quantité d'eau accumulée dans l'atmosphère est faible. Partant de considérations sur le bilan énergétique mondial, on admet que l'évaporation a augmenté au-dessus des océans pendant le XX<sup>e</sup> siècle ; toutefois, on ne dispose pas d'observations directes de cette tendance. Il n'existe pas non plus de données indiquant clairement un changement systématique à long terme de l'évaporation globale au-dessus des terres.

### Cours d'eau à débit variable

Il existe de nombreuses études sur le débit de cours d'eau. En raison de la diversité des réseaux d'observation et de l'influence attribuable aux aménagements hydrologiques, aux changements d'utilisation du territoire et à l'urbanisation, il est difficile d'obtenir une vue d'ensemble de ces changements sur une longue durée. En Europe, les bassins versants caractérisés par des conditions d'écoulement proches de la nature présentent, depuis quelques décennies, un schéma géographique systématique (données correspondant à la fenêtre temporelle de 1962 à 2004) : les débits tendent à diminuer dans les régions méridionales et orientales et à augmenter dans celles du nord et de l'ouest (Stahl et al. 2010).

<sup>1</sup> L'humidité atmosphérique relative exprime en pour cent le taux d'humidité de l'air par rapport à la saturation qui augmente, en vertu de l'effet Clausius-Clapeyron, parallèlement à la température. L'humidité atmosphérique absolue se mesure en grammes d'eau par kilogramme d'air ; elle indique la quantité d'eau contenue dans une masse d'air.



**Figure 1.13:** Projections, exprimées en pour cent, des pourcentages des changements en matière de précipitations par rapport à la période de 1986 à 2005 pour le scénario de référence RCP8.5. Les images montrent des projections pour à court (2016-2035, à gauche), moyen (2046-2065) et long terme (2081-2100, à droite), ainsi que pour l'hiver (en haut) et pour l'été (en bas). D'ici la fin du siècle, une forte augmentation (plus de 40 pour cent) est attendue aux hautes latitudes et une diminution sensible dans les régions subtropicales. Des fluctuations naturelles se superposent à ces tendances. Dans les régions en pointillés, les changements projetés surpasseront la variabilité naturelle, tandis que cette dernière prédominera dans les régions hachurées; ceci sera le cas notamment dans l'avenir proche. (Source: IPCC 2013/WGI/Fig.11-12 et Fig.12-22)

## Projections mondiales

Les projections du cycle hydrologique se fondent sur les mêmes modèles que celles de la température. Pour les précipitations jusqu'en 2100, elles indiquent un schéma de précipitations en hausse sous les tropiques et aux latitudes moyennes et hautes et en baisse dans les zones subtropicales (fig. 1.13). Ce schéma est un phénomène stable dans les projections climatiques et est quantitativement en bon accord avec celles du précédent rapport du GIEC (IPCC 2007). En Europe, ces projections font état d'une augmentation au nord et d'une diminution au sud; la Suisse se trouve dans la région de transition entre ces deux zones. Ce schéma se déplace selon les saisons, en hiver en direction du sud, en été vers le nord.

## Changements de la répartition des précipitations

Les changements du schéma des précipitations se manifesteront toujours plus clairement au cours du réchauffement planétaire; d'ici la fin du siècle, ils l'emporteront dans quelques régions sur la variabilité naturelle (fig. 1.13) (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique: les fluctuations à court terme du climat, p. 34). Mais dans un avenir proche, le régime des précipitations sera dominé par des fluctuations naturelles qui affaibliront ou renforceront en partie le signal climatique. Des écarts (négatifs) importants par rapport aux changements projetés sont possibles

sur des périodes de quelques années suite à des éruptions volcaniques. Les rejets anthropiques d'aérosols (poussière fine) peuvent également provoquer des changements au niveau des précipitations considérées à grande échelle. Une diminution du rayonnement solaire incident à la suite d'éruptions volcaniques ou la pollution anthropique par la poussière fine entraînent en général une baisse de la pluviométrie globale.

Les changements projetés incluent un renforcement général de l'évaporation dans la plupart des régions. Il est causé par une augmentation de l'énergie disponible à la surface de la Terre (provenant du rayonnement solaire incident de courte longueur d'onde et de celui de grande longueur d'onde rétrodiffusé par l'atmosphère). Une éventuelle augmentation de l'évaporation du sol dépend aussi de la disponibilité en eau (humidité du sol, eau souterraine, eaux de surface). Un dessèchement du sol, comme pendant l'été 2003 en Europe, peut entraîner un affaiblissement de l'évaporation.

## Régions subtropicales : la teneur en eau du sol et les débits diminueront à long terme

D'autres composantes du cycle hydrologique seront touchées. Une baisse de l'humidité relative (mais une hausse de l'humidité absolue) est attendue dans de nombreuses régions. Une diminution de la teneur en eau du sol est

considérée comme probable d'ici la fin du siècle dans de grandes parties des zones subtropicales – de l'Afrique nord-occidentale notamment, et dans l'espace méditerranéen. Une baisse des débits est également prévisible dans ces régions. Comme pour les précipitations, il s'agit de tendances à long terme, tandis que des fluctuations naturelles peuvent prédominer à court terme. En Europe méridionale, on s'attend à moyen terme à une plus grande consommation d'eau pour l'irrigation, ce qui renforcera le recul des débits dû à l'évolution du climat.

## Observations relatives à la Suisse

En raison des grandes fluctuations naturelles, les tendances à long terme des précipitations sont difficiles à distinguer pour un territoire relativement petit tel que la Suisse. Si l'on considère l'ensemble du pays, aucune tendance claire ne se manifeste actuellement pour les précipitations annuelles moyennes. Leurs variations dépendent fortement d'influences régionales et du cours des saisons. Ceci tient avant tout au fait que deux régimes de précipitations se font face en Suisse, l'un nord- et l'autre sud-alpin, et qu'ils ont chacun leurs particularités. Sur le Plateau, l'évolution à long terme des précipitations annuelles observée depuis le début des mesures en 1864 correspond à une augmentation des précipitations de 7,8 pour cent par 100 ans (MétéoSuisse 2015). Une telle tendance n'existe pas en Suisse méridionale. Par contre, une augmentation des fortes précipitations est constatée aujourd'hui déjà dans de nombreuses stations de mesures (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52).

## Plateau suisse : augmentation des précipitations en hiver

La ventilation par saison montre que sur le Plateau suisse, les précipitations n'augmentent clairement qu'en hiver – en moyenne de 22 pour cent par 100 ans depuis le début des mesures en 1864 (cf. fig. 1.14, Suisse nord-orientale). Aucune tendance à long terme claire (1864-2014) n'est décelable au printemps, en été et en automne. En Suisse méridionale, les précipitations ne présentent aucune tendance annuelle ou saisonnière statistiquement significative. Comme la figure 1.14 le met en évidence, des fluctuations décennales (ligne noire épaisse) ainsi que des variations considérables d'une année à l'autre (ligne noire fine) se superposent aux évolutions à long terme des précipitations.

## Les débits et l'évaporation ont changé

Dans des bassins versants naturels de la Suisse, des observations font état d'une augmentation de l'écoulement pendant les saisons froides (Birsan 2006). Ces changements dépendent fortement de l'altitude moyenne et du caractère physiogéographique des bassins versants considérés. L'augmentation des précipitations hivernales joue un rôle important, de même que l'ascension de la limite moyenne des chutes de neige d'environ 300 mètres pendant les dernières décennies. Il s'ensuit qu'une part toujours plus grande des précipitations tombe sous forme de pluie et s'écoule ainsi plus rapidement. Du fait du réchauffement, la neige fond plus tôt au printemps dans les Préalpes et les Alpes (Scherrer et al. 2013). En haute montagne, la fonte des glaciers s'est accentuée en été, ce qui entraîne des débits plus importants dans les bassins versants fortement englacés (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80, chap. 2.4 Eau, p. 84).

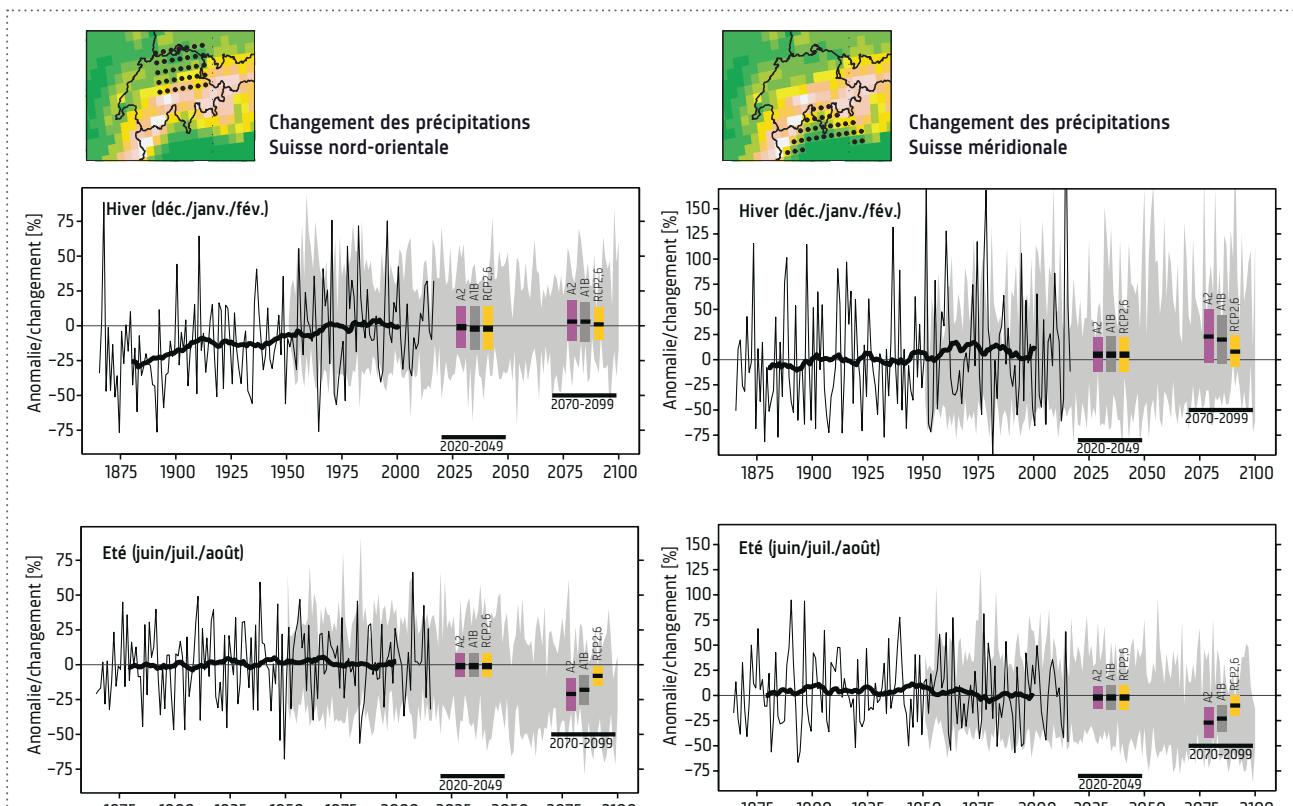
Des analyses dans des bassins versants fournissent des signes selon lesquels non seulement les précipitations hivernales, mais aussi l'évaporation estivale ont augmenté pendant le siècle dernier; il s'ensuit que les débits n'ont pas changé sensiblement en moyenne annuelle, en dépit de précipitations plus abondantes. Mais il existe aussi des indices suggérant que l'évaporation suit, à l'échelle de temps décennale, les changements du rayonnement global et qu'elle a ainsi passé d'une évolution à la baisse à une progression à la hausse pendant les années 1980.

## Projections pour la Suisse

Des évaluations pour l'Europe, basées sur plusieurs modèles climatiques mondiaux et régionaux, indiquent que vers la fin du siècle une grande partie de l'Europe centrale et septentrionale deviendra *probablement* plus humide et l'espace méditerranéen plus sec. Ce schéma général est en rapport avec l'évolution globale discutée plus haut vers un climat plus sec dans les régions subtropicales et plus humide aux hautes latitudes (IPCC 2013/WGI/Chap.12). La Suisse se trouve dans la zone de transition entre ces deux évolutions opposées. Au total sur une année, ces modèles ne signalent qu'une faible tendance pour les précipitations en Suisse. La pluviométrie annuelle future devrait se maintenir à un niveau semblable au climat actuel et les fluctuations naturelles resteront le facteur prédominant.

## Les étés deviennent plus secs

En revanche, deux tendances saisonnières principales se dégagent pour la Suisse en matière de précipitations



**Figure 1.14:** Changements passés et futurs des précipitations saisonnières en Suisse nord-orientale et en Suisse méridionale. Ils sont donnés en pour cent par rapport à la moyenne de la période de 1980 à 2009. Les lignes noires fines représentent les observations annuelles (écart de la moyenne); les lignes noires épaisses sont les valeurs moyennes correspondantes lissées sur 30 ans. Les observations mettent en évidence une augmentation significative des précipitations en hiver en Suisse nord-orientale (ligne noire); pendant les autres saisons, les précipitations sont caractérisées par de fortes fluctuations à une échelle de temps allant des années à des décennies (variabilité naturelle). La surface grise représente la fourchette des fluctuations annuelles telles que pronostiquées par des modèles climatiques pour le scénario d'émissions moyennes SRES-A1B. Les barres de couleur correspondent aux projections dans l'avenir et à leur domaine d'incertitude pour des périodes choisies de 30 ans et pour trois différents scénarios d'émission. La surface grise couvre le 5<sup>e</sup>-95<sup>e</sup> percentile annuel de l'ensemble de modèles. (Source: adapté d'après CH2011 2011)

pendant la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle (fig. 1.14): premièrement, les modèles projettent une augmentation des précipitations d'hiver moyennes dans certaines parties du pays; deuxièmement, il est prévisible que les précipitations d'été s'écartieront au cours du XXI<sup>e</sup> siècle du régime des fluctuations décennales actuelles; d'autre part, les quantités moyennes de précipitations diminueront *probablement* partout dans le pays (CH2011 2011). Considérée à grande échelle, cette tendance est en rapport avec la sécheresse méditerranéenne attendue, qui s'étendra en été également sur l'Europe centrale et sur tout l'arc alpin. Vu la grande variabilité des précipitations d'une année à l'autre, des étés humides pourront survenir isolément encore à la fin du siècle (cf. les domaines grisaille dans la fig. 1.14).

Des modèles d'évaluation élargis montrent que la diminution des précipitations estivales moyennes attendue en Suisse est due pour l'essentiel à un recul du nombre de

jours de pluie. La probabilité de phases sèches de plusieurs jours augmentera, tandis que le volume des précipitations pendant les jours de pluie restera à peu près au même niveau qu'aujourd'hui (Fischer et al. 2015; Rajczak et al. 2013; Ban et al. 2015). En automne et au printemps, les changements attendus seront plus faibles et se maintiendront en grande partie dans la fourchette de la variabilité naturelle.

En conséquence du réchauffement, les masses de neige et de glace stockées dans les Alpes diminueront fortement (Steger et al. 2013). Associée à la redistribution saisonnière des précipitations et avec le déplacement à plus haute altitude de la limite entre chutes de neige et de pluie, cette diminution conduira à une nouvelle répartition des écoulements au fil des saisons. En hiver, les débits grossiront dans la plupart des bassins versants de la Suisse. En été, la diminution des précipitations, l'intensification de l'évaporation et la fonte des neiges plus pré-

ceux feront descendre le niveau des eaux. Sur le Plateau, les niveaux d'étiage baisseront et les périodes de basses eaux dureront plus longtemps. Dans les Alpes, les débits augmenteront encore à moyen terme dans les bassins versants fortement englacés. Mais même dans ces régions, il faut compter d'ici la fin du siècle avec des diminutions notables des débits estivaux (OFEV 2012).

## Les rejets futurs de gaz à effet de serre sont déterminants

La sécheresse qui s'annonce en été et l'augmentation des précipitations en hiver dans certaines parties de la Suisse vers la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (2070-2099) dépendent fortement d'hypothèses au sujet des rejets futurs de gaz à effet de serre :

- **Eté:** Dans les scénarios sans mesures explicites de protection du climat (scénarios dits de référence), tels que SRES-A2, la quantité moyenne de précipitations diminuera, selon les régions, de 15 à 28 pour cent en été (fig. 1.14). Dans le cas d'efforts internationaux de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre (scénario d'atténuation RCP2,6), l'on s'attend en Suisse à une réduction nettement plus faible des précipitations estivales (environ 6 à 10 pour cent). Comme indiqué par les barres de couleur sur la figure 1.14, les changements peuvent toutefois différer sensiblement de ces valeurs. Par exemple, il est tout à fait possible selon le scénario de référence SRES-A2 que la pluviométrie diminue en Suisse nord-orientale dans une proportion située entre 10 et 33 pour cent.
- **Hiver:** L'évolution future des émissions de gaz à effet de serre joue également un rôle déterminant dans l'augmentation des précipitations hivernales : selon le scénario de référence SRES-A2, la hausse de la pluviométrie en Suisse méridionale atteindrait 23 pour cent, tandis qu'elle serait stabilisée à environ 8 pour cent selon le scénario d'atténuation RCP2,6 (cf. fig. 1.14).

## Défis pour les sciences du climat

### Séries d'observations à long terme

Pour se prononcer sur l'évolution à long terme des précipitations, il est absolument nécessaire de disposer de mesures instrumentales de haute qualité (notamment au sol et par satellites), qui remontent aussi loin que possible dans le passé. De telles séries constituent également une base indispensable pour calibrer et améliorer les modèles climatiques ainsi que les projections qui en découlent. Pendant les 20 dernières années, beaucoup de travail a été fait en ce sens, mais de grandes incertitudes subsistent néanmoins dans la plupart des régions. Elles tiennent à

des erreurs de mesure systématiques, à un nombre souvent insuffisant d'observations homogènes à long terme (par exemple en raison du déplacement de stations) et à la grande variabilité spatiale du signal en matière de précipitations. L'étude d'autres composantes du cycle hydrologique a également besoin d'observations homogènes sur une longue durée. En ce qui concerne les débits, des changements touchant à la structure de l'habitat et à l'utilisation du territoire, ou encore à la pratique agricole (par exemple à l'irrigation), peuvent porter atteinte à l'homogénéité des séries de mesures et doivent être alors également pris en compte.

Pour la Suisse, le réseau de mesure de MétéoSuisse fournit de longues séries homogènes sur les précipitations, la température et de nombreuses autres variables climatiques (par exemple la pression atmosphérique et la nébulosité); certaines stations d'observation effectuent de telles mesures depuis 1864 (Begert et al. 2005). Cette précieuse base de données permet de suivre l'évolution des précipitations en Suisse en tenant compte de la topographie complexe du pays. Il n'existe pas de longues séries d'observation assurant la couverture à grande échelle d'autres variables du cycle hydrologique, telles que l'évaporation ou l'humidité du sol (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52, chap. 2.4 Eau, p. 84).

### Prévoir les fluctuations naturelles

Les fluctuations naturelles représentent un défi supplémentaire pour la détection de tendances systématiques des précipitations. Surtout pour une petite région telle que la Suisse, les fluctuations annuelles ou décennales – causées entre autres par des modifications affectant la structure de la circulation atmosphérique au-dessus de l'Europe centrale (par exemple par l'oscillation nord-atlantique) – jouent un rôle important. Elles peuvent se superposer pendant plusieurs décennies à des tendances à long terme, qui sont alors difficiles à détecter (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique : les fluctuations à court terme du climat, p. 34).

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC fait état pour la première fois de prévisions climatiques sur dix ans au moyen desquelles on essaie de prévoir les fluctuations décennales (on parle ici de prévisions et non pas de projections climatiques). Les données de départ d'une simulation comprennent systématiquement les mesures océaniques les plus récentes enregistrées dans le monde. Cela permet d'améliorer les prévisions – jusqu'ici surtout pour les tropiques et pour la zone au-dessus du Pacifique. Le perfectionnement de cette méthode et la détermination plus précise de ses limites sont des préoccupations importantes.

## Affiner encore davantage les modèles climatiques

Les incertitudes en matière d'évaluation des changements futurs tiennent largement au fait que les processus de précipitations sont représentés de façon simplifiée dans les modèles climatiques. En raison de la résolution grossière des modèles, des processus qui ont une incidence sur les précipitations, mais qui se déroulent à petite échelle, doivent être simplifiés et décrits au moyen de relations semi-empiriques (paramétrisés). Dans l'arc alpin, la topographie complexe est également un grand défi. Des projets de recherche nationaux et internationaux cherchent à décrire les précipitations de façon plus fine dans des modèles à haute résolution.

Un défi fondamental concerne les projections du climat de l'été. Un exemple : alors que les températures de l'hiver se rapprochent de plus en plus de celles du printemps actuel, les températures et précipitations attendues vers la fin du siècle en été seront en dehors de la fourchette des variations naturelles du passé. Ceci représente un grand défi pour la modélisation du climat, vu qu'il s'agit de décrire des régimes climatiques qui n'ont encore jamais existé. C'est pourquoi ce domaine comporte de grandes incertitudes, non seulement au sujet de processus qui se déroulent dans l'atmosphère, mais aussi à propos de leur interaction avec l'hydrologie et avec la terre ferme.

## Bibliographie

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) **Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?** Geophysical Research Letters 42: 1165–1172.
- Begert M, Schlegel T, Kirchhofer W (2005) **Homogeneous temperature and precipitation series of Switzerland from 1864 to 2000.** International Journal of Climatology 25: 65–80.
- Birsan M-V, Molnar P, Burlando P, Pfandl M (2005) **Streamflow trends in Switzerland.** Journal of Hydrology. 314: 312–329.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011.** Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fischer AM, Keller D, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2015) **Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective.** International Journal of Climatology 35: 3204–3219.
- IPCC (2007) **Climate Change 2007: The Physical Science Basis (WGI).** Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp. [www.ipcc.ch/report/ar4/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar4/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- MétéoSuisse (2015) **Rapport climatologique 2014.** Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), Zurich, 80 pp.
- OFEV (2012) **Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau.** Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1217: 76 pp.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region.** Journal of Geophysical Research 118: 3610–3626.
- Scherrer S, Wuthrich C, Croci-Maspoli M, Weingartner R, Appenzeller C (2013) **Snow variability in the Swiss Alps 1864–2009.** International Journal of Climatology 33: 3162–3173.
- Stahl K, Hisdal H, Hannaford J, Tallaksen LM, van Lanen HAJ, Sauquet E, Demuth S, Fendekova M, Jodar J (2010) **Streamflow trends in Europe: evidence from a dataset of near-natural catchments.** Hydrology and Earth System Sciences 14: 2367–2382.
- Steiger C, Kotlarski S, Jonas T, Schär C (2013) **Alpine snow cover in a changing climate: a regional climate model perspective.** Climate Dynamics 41: 735–754.

## 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques

**Les événements climatiques et météorologiques ont toujours comporté des extrêmes. Mais depuis quelques décennies, des changements de certains de ces extrêmes se dessinent clairement sur l'ensemble du globe. Les extrêmes de température ont augmenté, par exemple les vagues de chaleur en été; les records de froid, en revanche, ont diminué. En Suisse aussi, on a enregistré davantage de journées très chaudes et moins de nuits très froides. Avec la hausse continue des températures moyennes mondiales, il faut s'attendre, dans le monde entier, à des extrêmes de chaleur et de précipitations plus nombreux et plus intenses, accompagnés cependant de pointes de froid moins marquées. La même évolution – se superposant toutefois à une variabilité élevée – est pronostiquée aussi pour la Suisse, où elle amplifiera le risque de crues, si l'on ne prend pas de mesures d'adaptation. Des projections climatiques signalent une hausse du risque de sécheresse en Europe centrale et dans l'espace méditerranéen, y compris la Suisse, mais elles comportent encore des incertitudes considérables. Les indications relatives aux changements d'autres phénomènes, tels que la fréquence et l'intensité des tempêtes de vent ou que des manifestations locales comme la grêle, sont peu sûres.**

Erich M. Fischer (EPF de Zurich), Christoph Schär (EPF de Zurich), Sonia I. Seneviratne (EPF de Zurich)

Il y a toujours eu des crues, des tempêtes, des sécheresses et des températures hors norme. De tels extrêmes climatiques et météorologiques ont souvent des conséquences très lourdes, notamment pour les infrastructures, en raison des dommages qu'ils causent aux bâtiments et aux voies de communication, mais aussi pour l'agriculture, la demande énergétique et la production d'électricité, le tourisme ou la santé. L'examen des changements prévisibles des extrêmes climatiques et météorologiques et de leurs causes sous-jacentes s'impose en raison de l'importance de leurs effets socioéconomiques et écologiques.

Le nombre de records des températures, qu'il s'agisse des plus hautes ou des plus basses enregistrées depuis le début des mesures, dénote également une évolution. Sans changement climatique, de nouveaux records deviendraient plus rares au fil des mesures et le rapport entre ceux de froid et ceux de chaleur resterait à peu près le même. Or contrairement à cela, un déséquilibre se dessine clairement depuis le milieu du XX<sup>e</sup> siècle, en Europe comme en Amérique du Nord : on a relevé davantage de records de chaleur, mais nettement moins de records de froid qu'attendu théoriquement (sans évolution du climat).

### Observations au niveau mondial

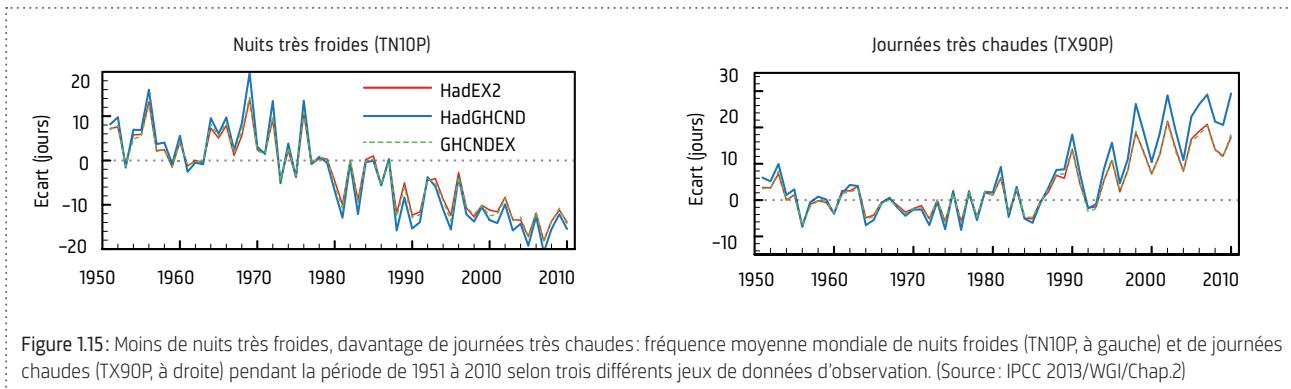
De nombreux extrêmes aux effets particulièrement spectaculaires ont été rapportés au cours des siècles et millénaires passés. Ces dernières décennies toutefois, certains extrêmes climatiques et météorologiques marquent, sur tout le globe, une tendance à l'augmentation (IPCC 2012/SREX/Chap.3 ; IPCC 2013/WGI/Chap.2).

### Plus de chaleur, moins de froid

Depuis 1950, on constate dans le monde entier une évolution significative vers davantage de journées et nuits très chaudes et moins de journées et nuits très froides (fig. 1.15) (Donat et al. 2013). La tendance à plus de jours très chauds s'est poursuivie ces dernières années, même les années où la température moyenne mondiale n'a pas augmenté de façon significative. En outre, surtout en Europe, en Asie et en Australie, on constate une hausse de la fréquence et de l'intensité des canicules en été et des périodes de chaleur hors norme pendant toutes les saisons.

### Les fortes précipitations ont augmenté en maints endroits

Les fortes précipitations présentent également des tendances nettement différentes de celles attendues en fonction de la variabilité naturelle du climat. Il y a dans le monde davantage de régions émergées où les fortes précipitations ont augmenté plutôt que diminué (IPCC 2012/SREX/Chap.3 ; IPCC 2013/WGI/Chap.2). Des changements relatifs aux fortes précipitations, en l'occurrence des augmentations régionales et saisonnières, sont constatés en Europe, en Amérique du Nord et centrale. Il est cependant plus difficile de mettre en évidence les changements relatifs à de fortes précipitations que ceux relatifs aux extrêmes de température, car l'intensité des précipitations peut fortement varier sur de courtes distances. En outre, il n'existe qu'un nombre très limité de séries fiables et suffisamment longues de mesures des précipitations.



L'augmentation des fortes précipitations, telle qu'elle est observée au niveau mondial, concorde avec notre compréhension des processus physiques: en raison de la hausse des températures, la teneur en humidité de l'atmosphère augmente, ce qui amplifie aussi l'intensité des fortes précipitations. La théorie physique prévoit un accroissement des fortes précipitations de six à sept pour cent par degré de réchauffement (effet Clausius-Clapeyron), mais une augmentation nettement plus faible des précipitations moyennes. En certaines régions et saisons, on s'attend même à une diminution des précipitations moyennes, et une augmentation des fortes précipitations (cf. chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46).

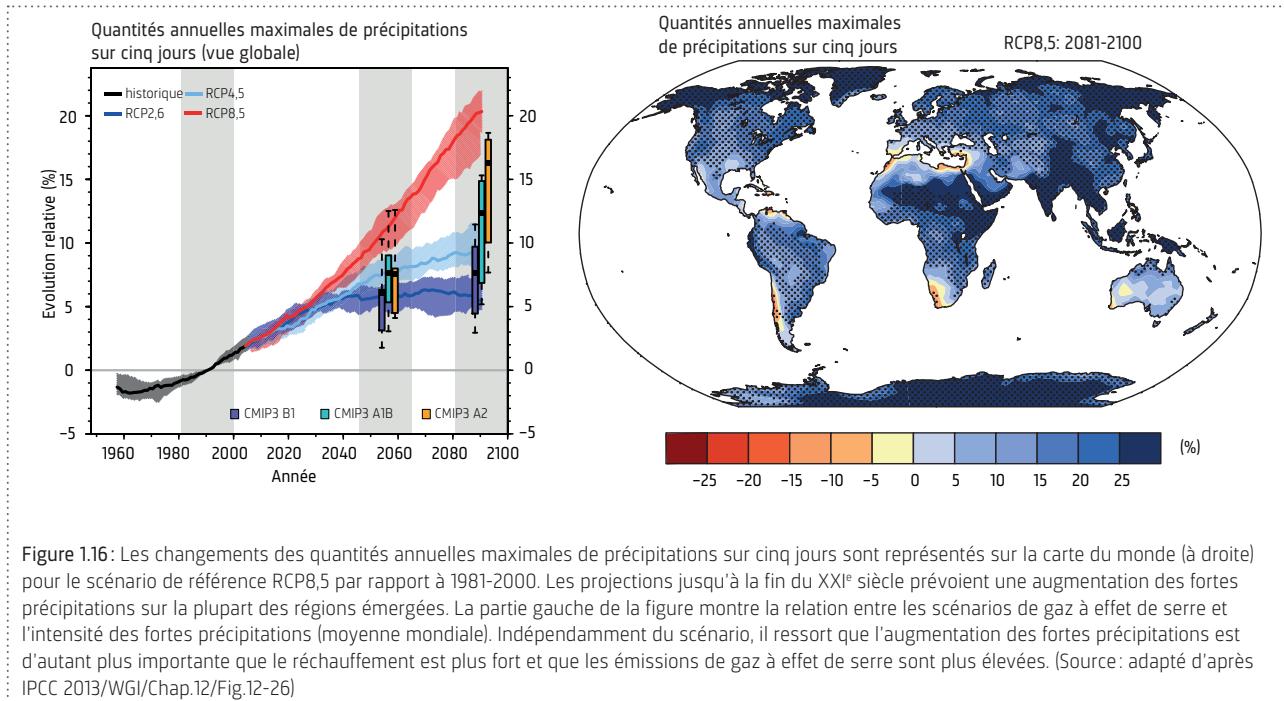
### Les changements observés en matière de sécheresse sont moins sûrs

Il est beaucoup plus difficile de constater des changements de la fréquence et de l'intensité des sécheresses (IPCC 2012/SREX/Chap.3). Comme les signes de ces changements dépendent en partie de la définition d'une sécheresse et diffèrent d'une région à une autre, on ne peut pas se prononcer avec certitude au sujet de l'évolution mondiale de ce phénomène (Sheffield et al. 2012; Trenberth et al. 2014). Comme ces sources d'incertitude n'ont été découvertes qu'après la parution du quatrième rapport d'évaluation du GIEC en 2007, les données sur la tendance mondiale ont été révisées dans les rapports ultérieurs. Des signes clairs de changement sont cependant constatés dans certaines régions. Un exemple: depuis 1950 environ, la sécheresse a augmenté dans l'espace méditerranéen et diminué dans certaines parties d'Amérique du Nord (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.2).

### L'influence humaine sur les extrêmes climatiques et météorologiques

La plupart du temps, les extrêmes climatiques et météorologiques résultent de la combinaison de nombreux facteurs, tels que des températures hors norme à la surface de la mer, une répartition extraordinaire de la banquise, une configuration particulière de la circulation atmosphérique ou des sols plus secs ou plus humides que d'ordinaire. Ces extrêmes sont de plus influencés par des développements aléatoires du système climatique. Aussi n'y a-t-il pas de lien de causalité direct entre tel ou tel extrême climatique ou météorologique et le changement climatique. Toutefois, les émissions anthropiques de gaz à effet de serre et d'aérosols peuvent fort bien influencer les facteurs contributifs et donc ainsi la probabilité d'occurrence ou l'intensité de ces extrêmes: depuis le quatrième rapport d'évaluation du GIEC, des indices qui tendent à montrer que l'influence humaine sur le climat a contribué à augmenter les extrêmes de chaleur et à intensifier les fortes précipitations.

Diverses études ont examiné dans quelle mesure des facteurs climatiques externes, tels que le changement climatique anthropique, ont influé sur la probabilité d'occurrence de certains événements extrêmes survenus récemment. Le recours à des modèles climatiques permet d'évaluer dans quelle mesure la probabilité d'un tel événement dans les conditions actuelles se distingue, par exemple, de la probabilité de cet événement dans des conditions préindustrielles. On a montré ainsi que l'influence humaine a plus que doublé la probabilité d'un été caniculaire comme celui de 2003 et qu'elle a augmenté la probabilité d'occurrence de la très forte vague de chaleur de 2010 en Russie. Mais la quantification exacte de ces effets dépend de la définition de l'événement et de la méthode, ainsi que de la question traitée, par exemple, si l'on a évalué l'influence humaine sur la probabilité d'occurrence ou sur l'intensité de l'événement considéré.



**Figure 1.16:** Les changements des quantités annuelles maximales de précipitations sur cinq jours sont représentés sur la carte du monde (à droite) pour le scénario de référence RCP8,5 par rapport à 1981-2000. Les projections jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle prévoient une augmentation des fortes précipitations sur la plupart des régions émergées. La partie gauche de la figure montre la relation entre les scénarios de gaz à effet de serre et l'intensité des fortes précipitations (moyenne mondiale). Indépendamment du scénario, il ressort que l'augmentation des fortes précipitations est d'autant plus importante que le réchauffement est plus fort et que les émissions de gaz à effet de serre sont plus élevées. (Source: adapté d'après IPCC 2013/WGI/Chap.12/Fig.12-26)

## Projections au niveau mondial

Une augmentation des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre influencera, à l'avenir aussi, la fréquence et l'intensité de certains extrêmes météorologiques.

### A l'avenir, davantage d'extrêmes de chaleur et moins d'extrêmes de froid

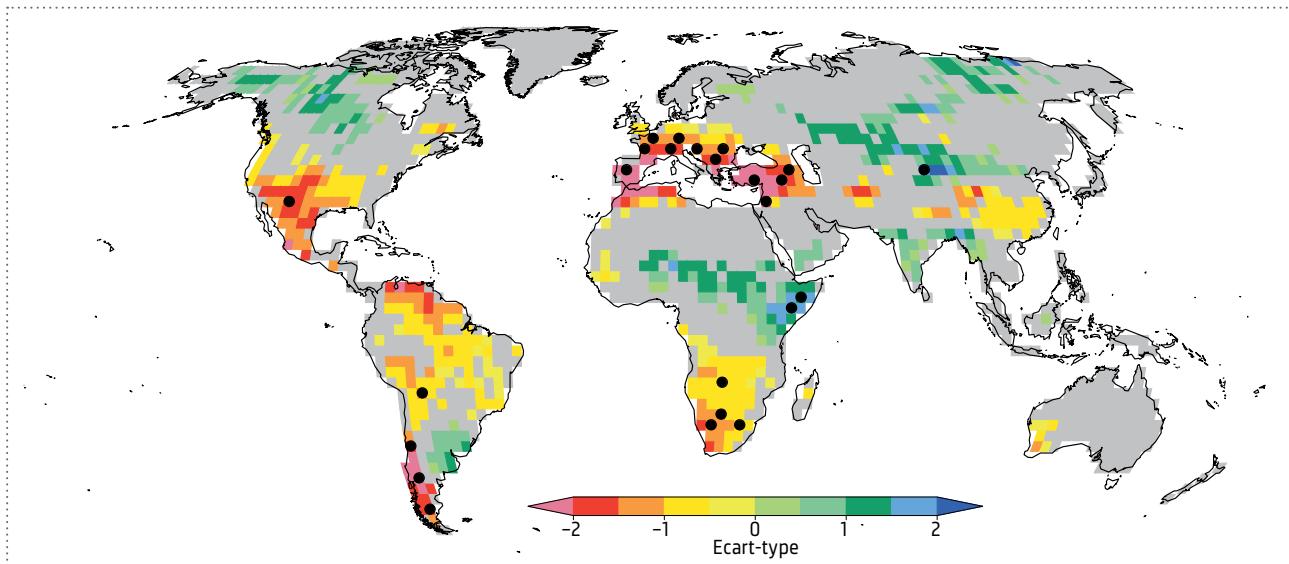
Il est *presque certain* que des températures moyennes mondiales en hausse dans la plupart des régions auront pour corollaire davantage d'extrêmes de chaleur et moins d'extrêmes de froid (IPCC 2013/WGI/Chap.11 et Chap.12). Il faut s'attendre, en été, à des vagues de chaleur plus fréquentes, plus longues et plus intenses et, pendant les autres saisons, à des périodes chaudes hors norme. Des extrêmes de chaleur qui surviennent aujourd'hui en moyenne seulement tous les vingt ans seront au moins deux fois plus fréquents à la fin du siècle; il faut s'attendre à ce qu'ils se produisent même presque chaque année dans certaines régions, au cas où les émissions évolueraient selon le scénario sans mesures explicites de protection du climat (en bref: scénario de référence) RCP8,5 (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

A l'inverse, des extrêmes de froid qui surviennent aujourd'hui en moyenne tous les vingt ans pourraient devenir rares à l'avenir. Aux hautes latitudes, ces extrêmes

deviendront non seulement moins froids, mais leurs températures augmenteront de façon plus marquée que les températures moyennes. Néanmoins, en raison de l'importante variabilité du temps hivernal, il faut s'attendre à ce qu'il y ait, à l'avenir aussi, de temps en temps des vagues de froid en hiver.

### Les influences sur les fortes précipitations dans l'avenir proche diffèrent de celles dans l'avenir lointain

A propos des tendances des fortes précipitations, il importe de distinguer entre l'avenir proche et l'avenir lointain (entre les prochaines décennies et la période jusqu'à la fin du siècle). L'influence des gaz à effet de serre prédominera dans l'avenir lointain, tandis que la variabilité naturelle prévaudra dans le futur proche, c'est-à-dire au cours des prochaines années (IPCC 2013/WGI/Chap.11; Fischer et al. 2013) (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique: les fluctuations à court terme du climat, p. 34). L'importance de la variabilité naturelle de ces prochaines décennies dépend fortement de la région (par exemple les tropiques par rapport aux latitudes moyennes), de l'échelle horizontale (régionale par rapport à continentale), du paramètre considéré (la température par rapport aux précipitations) et de l'extrême en question (par exemple des extrêmes journaliers par rapport à saisonniers).



**Figure 1.17:** Moyenne des projections de modèles CMIP5 (scénario de référence RCP8,5) pour les changements de l'humidité du sol en 2081-2100 par rapport à 1980-1999. Les valeurs sont exprimées en tant qu'écart-types des valeurs annuelles de 1961 à 2100 (après élimination de la tendance linéaire). Les nuances de couleurs désignent des régions où au moins deux tiers des modèles concordent quant au signe (+/-) des changements; l'ajout de pointillés indique qu'au moins 90 pour cent des modèles concordent quant au signe. (Source: Orlowsky & Seneviratne 2013)

Pour la fin du siècle, les modèles climatiques prédisent unanimement une augmentation des fortes précipitations sous les tropiques et aux latitudes moyennes et hautes (fig. 1.16). Des émissions plus élevées de gaz à effet de serre entraîneront une augmentation plus marquée des fortes précipitations, en rapport avec la hausse des températures sur la planète (fig. 1.16). Partant des modélisations et de notre compréhension des processus physiques, il faut s'attendre à ce que l'intensité des fortes précipitations augmente en général plus fortement que les quantités annuelles de précipitations.

### Le risque de sécheresse augmentera à l'avenir en Europe centrale et méridionale

Des projections montrent que le changement climatique conduit, notamment en Europe méridionale, ainsi qu'en été aussi en Europe centrale, à un recul des sommes de précipitation et à un renforcement de l'évaporation (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.12; Orlowsky & Seneviratne 2013; Rajczak et al. 2013). Ces changements intensifient la perte d'humidité du terrain et accroissent ainsi le risque de dessèchement du sol (fig. 1.17), un facteur critique pour les écosystèmes et l'agriculture. Mais les projections pour les changements en matière de sécheresse sont beaucoup moins robustes que celles portant sur les extrêmes de chaleur et les fortes précipitations, et les modèles divergent davantage.

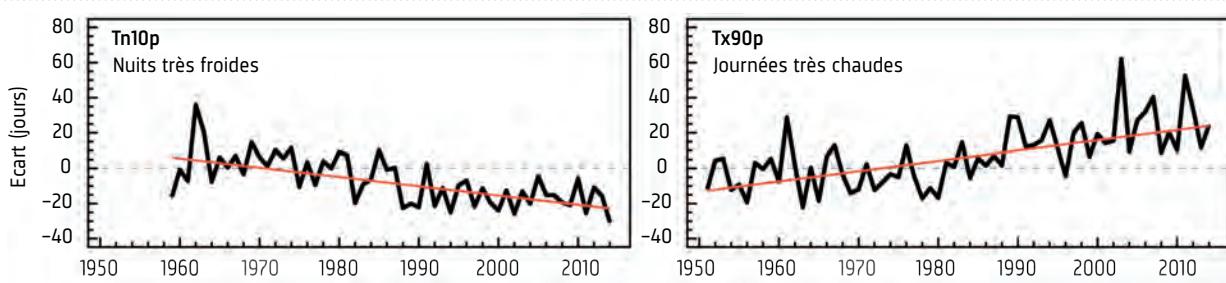
### Des phénomènes aux projections incertaines

Les changements d'autres phénomènes, par exemple les cyclones tropicaux, sont considérés comme incertains. Sur la base des prévisions des modèles et de notre compréhension des processus physiques, il faut s'attendre à des cyclones non pas plus nombreux, mais plus intenses. Cela signifie que lors des cyclones tropicaux les plus intenses, la vitesse maximale du vent et l'intensité des précipitations seront plus élevées.

Enfin, il existe quelques phénomènes – par exemple les chutes de grêle, les tornades ou les trombes – pour lesquels on a décelé en partie des indices scientifiques de changements, mais pas établi de projections fiables. Cela tient à l'insuffisance des mesures et au fait que les processus physiques sous-jacents, complexes et souvent très locaux, ne sont souvent pas encore compris en détail.

### Observations se rapportant à la Suisse

Pendant les deux décennies passées, la Suisse a été exposée à de nombreux extrêmes climatiques et météorologiques, tels que, par exemple, les fortes précipitations d'août 2005, la canicule et la sécheresse hors du commun de l'été 2003, la tempête Lothar en 1999 ou les hivers 2005/2006 et 2009/2010, très froids en comparaison des dernières décennies (mais pas du siècle passé).



**Figure 1.18:** Davantage de journées très chaudes et moins de nuits très froides aussi en Suisse: écart, par rapport à la période de référence 1961-1990, des nuits froides (TN10p, à gauche) et des journées chaudes (Tx90p, à droite) des périodes 1951-2014 (Tx90p) et 1959-2014 (TN10p), pour lesquelles des données de mesure homogénéisées sont disponibles. La figure présente la moyenne sur douze stations d'observation de toutes les régions climatiques. Les données utilisées ont été homogénéisées. L'évolution et les tendances sont très semblables dans toutes les stations. La tendance moyenne (selon Mann-Kendall) correspond à -5.3 jours/10 années pour TN10p et à +5.7 jours/10 années pour TX90p. (Source: Rebekka Posselt, adapté d'après Scherrer et al. 2016)

A l'échelle de la Suisse, les signes de changements en matière d'extrêmes climatiques et météorologiques interfèrent avec une forte variabilité naturelle (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique: les fluctuations à court terme du climat, p. 34). C'est pourquoi il est particulièrement difficile d'apporter la preuve de tels changements, surtout sur une surface aussi petite, comparativement, que la Suisse.

### Des jours chauds plus nombreux et plus torrides et moins de jours froids

Néanmoins, la tendance à des jours plus nombreux de chaleur plus intense (Scherrer et al. 2016) et à moins de jours froids est constatée aussi en Suisse dans la plupart des stations d'observation (fig. 1.18) (cf. chap. 1.6 La température, p. 40). En Europe centrale, la tendance à des jours de chaleur plus intense est même particulièrement marquée en comparaison avec le reste du monde et presque sans pareil pour des régions densément peuplées (Donat et al. 2013). En accord avec le changement global, la fréquence et l'intensité des fortes précipitations ont augmenté aussi en Suisse dans la plupart des stations d'observation (Scherrer et al. 2016) (cf. chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46).

Aucun changement significatif n'est établi scientifiquement pour de nombreuses autres sortes d'extrêmes climatiques et météorologiques survenant en Suisse, tels que les sécheresses, tempêtes de vent, épisodes de grêle, fortes chutes de neige, trombes ou tornades.

## Projections pour la Suisse

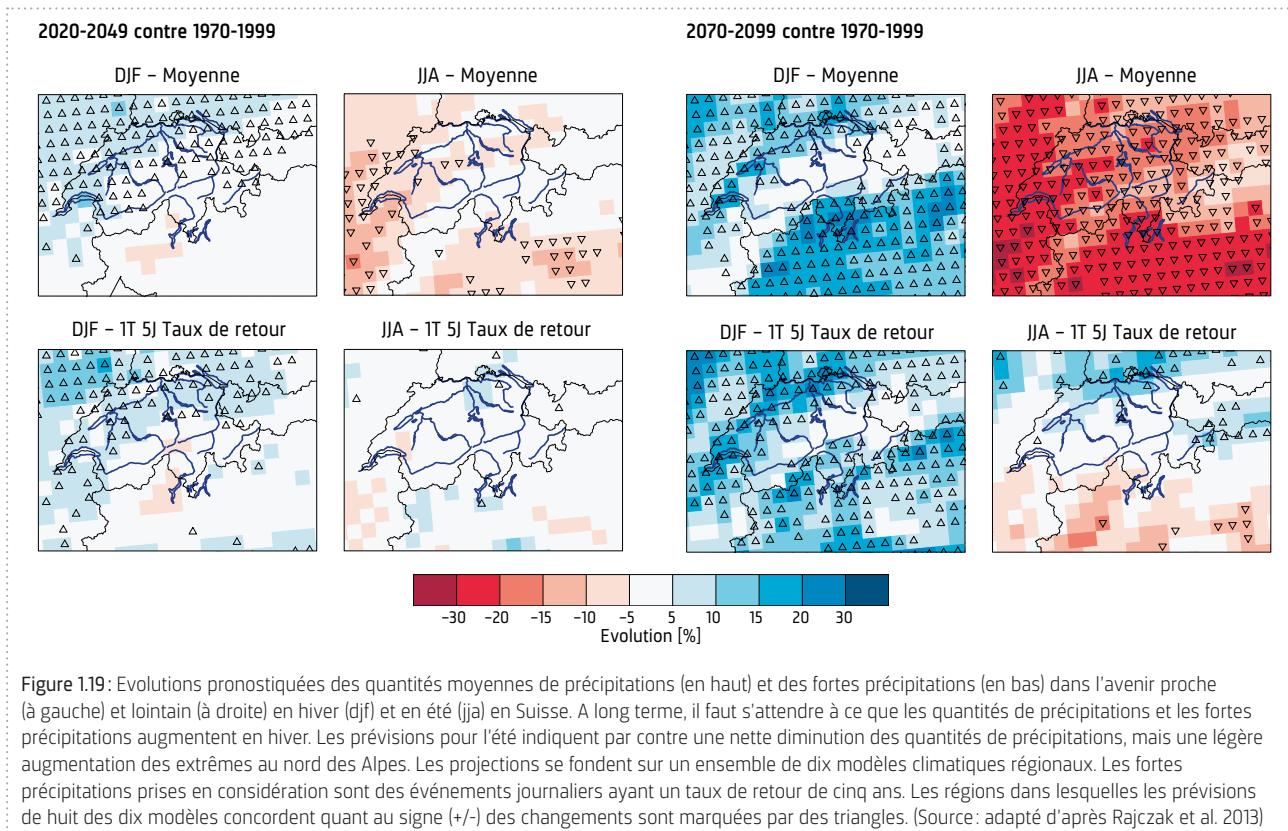
### Les journées et les nuits chaudes et humides augmentent

Un changement des extrêmes de température est attendu également en Suisse. A l'avenir, comme dans le passé, les extrêmes de chaleur devraient s'intensifier davantage en Europe centrale qu'ailleurs dans le monde. Il ressort en effet de la majorité des modélisations que la variabilité estivale de la température augmente, notamment en Europe centrale, en relation avec un changement du degré d'humidité du sol (IPCC 2012/SREX/Chap.3). Il s'ensuit que les températures des extrêmes de chaleur augmentent davantage que les températures moyennes correspondantes.

La hausse des températures et l'augmentation de l'humidité absolue de l'air accroissent le stress thermique auquel sont exposés les hommes et les animaux. Les nuits et les journées très chaudes et humides sont étroitement corrélées à une hausse de la morbidité et de la mortalité. Une augmentation marquée du stress thermique est attendue en particulier dans les régions de basse altitude telles que le Plateau et le Tessin.

### Les fortes précipitations tendent à devenir plus nombreuses et plus intenses

En accord avec les prévisions globales, des fortes précipitations plus nombreuses et plus intenses sont également attendues en Suisse (fig. 1.19). En hiver, l'augmentation en pour cent des fortes précipitations sera semblable à celle des quantités moyennes de précipitations (comparer les parties supérieures et inférieures de la fig. 1.19). En été par contre, il faut compter avec une diminution des



**Figure 1.19:** Evolutions pronostiquées des quantités moyennes de précipitations (en haut) et des fortes précipitations (en bas) dans l'avenir proche (à gauche) et lointain (à droite) en hiver (djf) et en été (jja) en Suisse. À long terme, il faut s'attendre à ce que les quantités de précipitations et les fortes précipitations augmentent en hiver. Les prévisions pour l'été indiquent par contre une nette diminution des quantités de précipitations, mais une légère augmentation des extrêmes au nord des Alpes. Les projections se fondent sur un ensemble de dix modèles climatiques régionaux. Les fortes précipitations prises en considération sont des événements journaliers ayant un taux de retour de cinq ans. Les régions dans lesquelles les prévisions de huit des dix modèles concordent quant au signe (+/-) des changements sont marquées par des triangles. (Source: adapté d'après Rajczak et al. 2013)

quantités de précipitations, tandis que les fortes précipitations tendront plutôt à augmenter. Les manifestations signalant cette évolution devraient s'accentuer au cours du siècle; dans des scénarios moyens, les changements relatifs atteignent jusqu'à 30 pour cent. Comme expliqué dans la section sur les projections au niveau mondial et dans l'article sur la variabilité climatique (cf. chap. 1.3 La variabilité climatique: les fluctuations à court terme du climat, p. 34), des variations naturelles se superposeront à la tendance prévisible du climat. Apporter la preuve d'une augmentation des fortes précipitations en Suisse est donc difficile, mais semble néanmoins possible déjà aujourd'hui selon les modèles, probablement d'abord pendant les saisons froides (comparer les deux périodes dans la fig. 1.19).

L'examen de sédiments des derniers 2500 ans, prélevés en Suisse dans des lacs de montagne, a montré récemment que les étés chauds sont en général relativement secs en Suisse; de ce fait, les crues de grande envergure sont plus rares pendant les étés chauds. Ces résultats se rapportent à des épisodes de précipitations de longue durée et de grande étendue. Ils ne sont donc pas en contradiction avec l'augmentation prévue de brefs épisodes de fortes précipitations, peu étendus et intenses.

Les résultats présentés dans la figure 1.19 se réfèrent à des précipitations journalières. Selon des simulations à haute résolution, les fortes précipitations de courte durée (de l'ordre de l'heure) augmentent nettement davantage; mais l'effet Clausius-Clapeyron s'applique aussi dans ce cas, ce qui implique une augmentation maximale de six à sept pour cent par degré de réchauffement (Ban et al. 2015). Dans l'arc alpin, les événements de courte durée revêtent une importance particulière en été, lorsque de brèves pointes de précipitations entraînent la formation de crues soudaines («flash floods»), de laves torrentielles et de glissements de terrain.

## Le risque de crues augmente

La montée des températures accroît la part des précipitations qui tombent, selon la saison et l'altitude, sous forme de pluie plutôt que de neige. En l'absence de mesures d'adaptation, le risque de crues s'aggrave donc même sans augmentation des fortes précipitations. Dans certains bassins, comme celui du Rhin près de Bâle, cet effet se manifeste de façon particulièrement prononcée en hiver, tandis que dans les bassins versants du sud des Alpes, il se produit plutôt lors de situations météorologiques survenant en automne.

## Le risque de sécheresse augmente, mais les projections ne sont pas très fiables

Sur la base de scénarios climatiques globaux (fig. 1.17), on peut déduire pour la Suisse que le risque de sécheresse – et notamment de dessèchement du sol – augmentera à l'avenir. Des scénarios détaillés pour la Suisse indiquent eux aussi une tendance à la diminution des précipitations en été (CH2011 2011; Ban et al. 2015). Cependant, les modèles présentent un plus haut degré d'incertitude pour l'évolution de la sécheresse que pour celle des extrêmes de température et des fortes précipitations.

## Projections incertaines pour d'autres phénomènes

Pour de nombreux autres extrêmes climatiques et météorologiques, les prévisions à petite échelle géographique sont liées à de grandes incertitudes. Un exemple : on ne sait pas au juste si les tempêtes d'hiver, comme Lothar et Vivian qui ont causé de gros dommages en Suisse, seront plus intenses et plus fréquentes à l'avenir. On s'attend à ce que les zones de basse pression, et les vents de tempête qui les accompagnent, gagnent un peu en intensité sur l'Europe du Nord et s'affaiblissent sur l'Europe méridionale. La Suisse se trouvant à la limite entre la région de l'augmentation et celle de la diminution, il n'est pas possible, pour le moment, de faire des prévisions robustes.

## Les événements extrêmes ne changent pas de façon homogène

Les changements attendus en Suisse en matière d'extrêmes météorologiques sont cohérents avec l'évolution à grande échelle en Europe (et même dans le monde pour les extrêmes de chaleur), mais ils interféreront avec une variabilité naturelle élevée (Fischer et al. 2013). C'est pourquoi les extrêmes ne changeront pas de façon continue en Suisse. Il faut plutôt s'attendre à ce que certains d'entre eux n'augmentent presque pas pendant des périodes pouvant atteindre des décennies, avant de s'amplifier ensuite très rapidement, ou inversement.

## Défis pour la recherche climatique

Dans l'ensemble, prouver l'existence de changements observés en matière d'extrêmes climatiques et météorologiques relève du défi. Les changements des extrêmes de température et des fortes précipitations sont relativement bien compris, mais d'autres extrêmes, tels que les tempêtes de vent et la grêle, comportent des incertitudes

considérables ou n'ont pas donné lieu à suffisamment d'études scientifiques et de séries de mesures. Les incertitudes des modèles et des données sont également considérables pour la sécheresse : d'une part, il n'existe pas de définition universelle des extrêmes climatiques et météorologiques ; d'autre part, les vagues de chaleur et les sécheresses sous les tropiques diffèrent fortement de celles aux hautes latitudes. Mais il serait faux de conclure de ces incertitudes que ces extrêmes ne changeront pas dans le futur. Comme il serait trompeur aussi d'argumenter qu'en raison du changement climatique, tous les extrêmes météorologiques doivent obligatoirement se renforcer.

Prévue de façon très fiable, l'augmentation, dans le monde entier, des extrêmes de chaleur et des fortes précipitations pourrait avoir de graves conséquences si l'on ne met pas en œuvre les mesures d'adaptation nécessaires. Le risque de dommages pourrait s'accroître également pour des extrêmes climatiques et météorologiques moins fréquents, en raison d'un renforcement de facteurs démographiques, économiques et techniques (densité de population plus élevée, concentration de valeurs et vulnérabilité). On peut faire face à une partie de ce risque par une meilleure préparation aux événements extrêmes et par l'adaptation au changement climatique.

## Evaluation approfondie des risques

Un autre défi est que, par définition, les extrêmes climatiques et météorologiques surviennent rarement et irrégulièrement. Dans l'idéal, il faudrait recourir à des séries de mesures relevées sur de vastes étendues pendant longtemps. Comme de telles séries n'existent pas, des indications fiables ne peuvent être obtenues le plus souvent que si l'on constate des tendances cohérentes à grande échelle. Un regard sur les 20 à 30 dernières années seulement peut facilement conduire à une fausse évaluation des risques. Trop souvent, tant des non spécialistes que des experts sont surpris par l'intensité d'extrêmes météorologiques qui n'ont jamais été observés avec une ampleur comparable pendant ces dernières décennies. C'est pourquoi une évaluation approfondie du risque d'atteintes par des événements extrêmes doit faire appel à une combinaison de longues séries de mesures et de documents historiques, de compréhension des processus physiques et de modélisation du climat et des impacts. (cf. CH2014-Impacts 2014)

## Bibliographie

- Ban N, Schmidli J, Schär C (2015) **Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster?** Geophysical Research Letters 42: 1165–1172.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011.** Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC. Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7.
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Donat MG, Alexander LV, Yang H, Durre R, Vose R, Dunn RJH, Willett KM, Aguilar E, Brunet M, Caesar J, Hewitson B, Jack C, Klein Tank AMG, Kruger AC, Marengo J, Peterson TC, Renom M, Oria Rojas C, Rusticucci M, Salinger J, Elrayah AS, Sekele SS, Srivastava AK, Trewin B, Villaruel C, Vincent LA, Zhai P, Zhang X, Kitching S (2013) **Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118: 2098–2118.
- Fischer EM, Beyerle U, Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes.** Nature Climate Change 3: 1033–1038.
- IPCC (2012) **Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).** Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1).** Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1).** Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1).** Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- Orlowsky B, Seneviratne SI (2013) **Elusive drought: Uncertainty in observed trends and short- and long-term CMIP5 projections.** Hydrology and Earth System Sciences 17: 1765–1781.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine region.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres 118: 3610–3626.
- Scherrer SC, Fischer EM, Posselt R, Liniger MA, Croci-Maspoli M, Knutti R (2016) **Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland.** Journal of Geophysical Research: Atmospheres 121: 2626–2637.
- Sheffield J, Wood E, Roderick M (2012) **Little change in global drought over the past 60 years.** Nature 491: 435–438.
- Trenberth K, Dai A, van der Schrier G, Jones P, Barichivich J, Briffa K, Sheffield J (2014) **Global warming and changes in drought.** Nature Climate Change 4: 17–22.

## 1.9 Les océans et la cryosphère

**Les changements du système climatique se manifestent aussi dans les océans et dans la cryosphère.** Cette dernière comprend la neige et la glace à la surface terrestre (sur le sol et sur l'eau), ainsi que les zones de pergélisol dans le sous-sol. Des effets typiques de ces changements sont le réchauffement et l'acidification des océans – avec des conséquences pour les écosystèmes marins –, l'élévation du niveau de la mer, le recul des glaciers, des inlandsis, de la banquise et de la couverture neigeuse sur l'hémisphère Nord, ainsi que le réchauffement et le dégel du pergélisol. Ces changements touchent de près la Suisse en ce qui concerne la neige, les glaciers et le pergélisol. La forte tendance au recul enregistrée pendant les deux dernières décennies pour ces composantes de la cryosphère est en accord avec l'augmentation marquée de la température de l'air. Même si l'on stoppait immédiatement le réchauffement, les glaciers et le pergélisol continueraient de régresser encore pendant plusieurs décennies, parce qu'ils réagissent très en retard au changement du climat. Quant au niveau de la mer, il monterait même encore pendant des siècles, car la chaleur de l'atmosphère n'est transportée que lentement à travers la surface des océans jusqu'aux eaux profondes. Mais si le réchauffement se poursuit, cette évolution s'accélérera.

Gian-Kasper Plattner (Université de Berne, \*aujourd'hui au WSL), Thomas F. Stocker (Université de Berne),  
Christoph Marty (SLF), Jeannette Nötzli (Université de Zurich, \*aujourd'hui au SLF), Frank Paul (Université de Zurich),  
Christian Huggel (Université de Zurich)

### Observations au niveau mondial

Dans les océans, le changement climatique se manifeste entre autres par une augmentation de l'énergie stockée dans la mer et – corrélativement – par le réchauffement de l'eau, ainsi que par l'élévation du niveau marin et par l'acidification des océans en raison de l'absorption de davantage de CO<sub>2</sub> atmosphérique. Dans la cryosphère, il se traduit notamment par la diminution des masses de glace polaires, par un recul spectaculaire des glaciers dans le monde entier, souvent à un rythme toujours plus rapide, par la réduction de l'étendue de la banquise arctique, par l'amenuisement de la couverture neigeuse, surtout dans l'hémisphère Nord et au printemps, ainsi que par le réchauffement et le dégel du pergélisol dans la plupart des régions du globe. Ces modifications de la cryosphère et des océans sont en partie étroitement liées entre elles. C'est ainsi que la fonte des inlandsis et le recul général des glaciers contribuent substantiellement à l'élévation du niveau des océans (fig. 1.20) et que le réchauffement de ces derniers accélère la fonte des glaciers qui débouchent dans la mer. Tous ces changements sont bien établis par des mesures effectuées dans le monde entier, avant tout depuis la seconde moitié du XX<sup>e</sup> siècle (IPCC 2013/WGI).

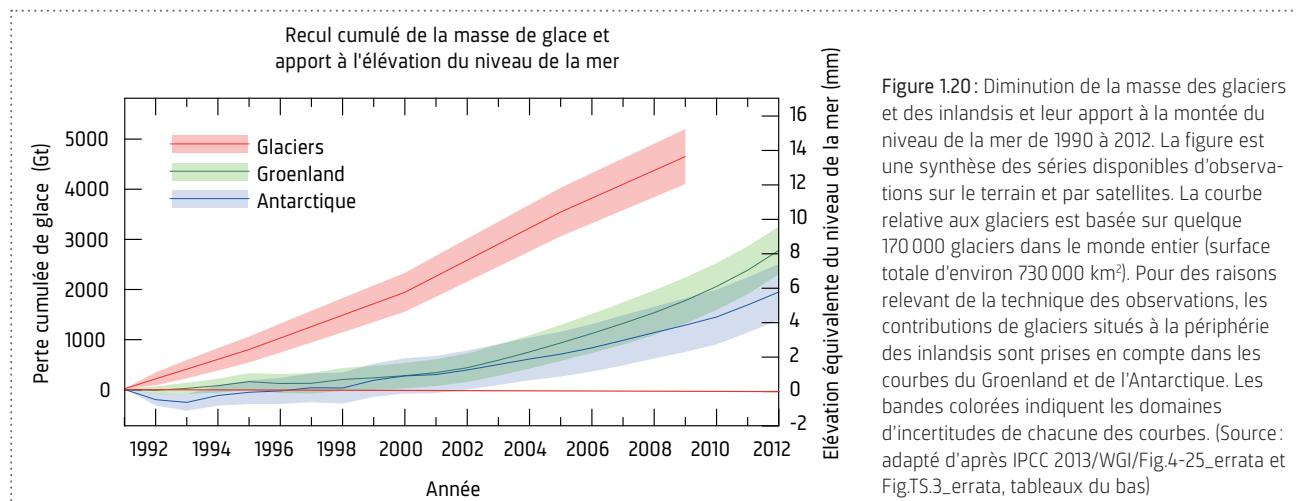
### Les océans se réchauffent et s'acidifient

Au cours des dernières décennies, les océans se sont réchauffés (IPCC 2013/WGI/Chap.3). Les plus fortes augmentations de la température y ont été mesurées dans

les 700 mètres supérieurs. Au total, plus de 90 pour cent du surplus d'énergie accumulé de 1971 à 2010 dans le système climatique ont été stockés dans les océans sous forme de chaleur et ont conduit au réchauffement de l'eau constaté jusqu'à de grandes profondeurs. Il est *très probable* que l'augmentation anthropique de la température a largement contribué à ce réchauffement des mers (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Par l'effet qu'ils exercent sur la densité, les changements de la température et de la teneur en sel des océans influent sur la stratification des masses d'eau et sur les grands courants marins. Mais il n'y a jusqu'ici aucun indice d'un changement de la circulation océanique mondiale et, en particulier, de la circulation méridionale de renversement de l'Atlantique (dont le Gulf Stream fait partie) (IPCC 2013/WGI/Chap.3). Les fluctuations de cette circulation ont une grande influence sur le transport de chaleur de l'équateur aux hautes latitudes nord et, par conséquent, sur le climat en Europe et dans l'Atlantique Nord. Les températures à la surface des océans ont en outre une incidence sur des phénomènes climatiques tels que les sécheresses en Afrique du Nord ou que la formation et la fréquence de cyclones tropicaux dans l'Atlantique (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52).

Environ un quart du CO<sub>2</sub> rejeté dans l'atmosphère par des activités humaines est absorbé aujourd'hui par les océans (IPCC 2013/WGI/Chap.3 et Chap.6). Cette absorption de CO<sub>2</sub> supplémentaire par l'océan ralentit l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et, par conséquent, le changement climatique ; mais elle entraîne



en même temps une diminution du pH<sup>1</sup>, c'est-à-dire une augmentation de la teneur en acide des océans. Ceci a des conséquences de grande portée pour les écosystèmes marins et la chaîne alimentaire, notamment parce que les coquilles de calcaire se forment alors plus difficilement (IPCC 2013/WGI/Chap.3 ; IPCC 2014/WGII/Chap.6).

### La cryosphère: recul de la glace, de la neige et du pergélisol

Au cours des dernières décennies, les glaciers ont fortement décrû dans le monde entier: leur étendue et leur masse diminuent. La perte de glace s'est *très probablement* encore accélérée depuis 1993. En outre, l'étendue des glaciers n'est de loin pas encore en équilibre avec le climat qui règne actuellement. Cela signifie qu'ils décroîtraient encore même sans hausse supplémentaire de la température (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Les activités humaines ont *probablement* contribué au recul des glaciers observé depuis les années 1980 (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Pendant les deux décennies passées, les inlandsis arctique et antarctique ont perdu de la masse (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Les mesures satellitaires disponibles à partir de 1992 ont permis de constater que depuis cette date, la masse de l'inlandsis du Groenland a diminué année après année et que ce processus s'est intensifié entre 2002 et 2011. Les pertes de glace de l'inlandsis antarctique (principalement par la rupture de gros blocs de glace) se sont également accélérées depuis 1992. Mais alors qu'au Groenland elles sont réparties sur de vastes zones, dans l'Antarctique elles se limitent à quelques régions côtières.

Par l'augmentation de la température résultant de ses activités,<sup>2</sup> l'homme a *probablement* contribué à la perte croissante de glace au Groenland. Cependant, des facteurs naturels et la variabilité naturelle du climat doivent être également pris en considération aussi bien au Groenland que dans l'Antarctique (IPCC 2013/WGI/Chap.10).

Au cours des dernières décennies, l'étendue de la banquise dans l'hémisphère Nord a connu une évolution inverse de celle dans l'hémisphère Sud. De 1979 à 2012, l'étendue de la banquise arctique a diminué entre 3,5 et 4,1 pour cent par décennie. Cette décroissance a été constatée pendant toutes les saisons, mais c'est au cours des mois d'été qu'elle était la plus forte (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Des reconstitutions du climat montrent qu'un recul de la banquise arctique, comme celui observé pendant ces 30 dernières années, est exceptionnel et ne s'est jamais produit pendant les presque 1500 ans passés (IPCC 2013/WGI/Chap.5). Par contre, l'étendue de la banquise antarctique a augmenté entre 1,2 et 1,8 pour cent par décennie de 1979 à 2012 (IPCC 2013/WGI/Chap.4). Les causes de ces évolutions divergentes sont actuellement un important sujet de recherche (IPCC 2013/WGI/Chap.10), car l'étendue de la banquise a une grande incidence sur le système climatique mondial, en raison surtout de la rétroaction de l'albédo de la glace.<sup>3</sup>

Dans la plupart des régions du monde pour lesquelles il existe de longues séries de mesures, on constate, à basse

<sup>2</sup> Il s'agit principalement de la combustion d'agents énergétiques fossiles (charbon, pétrole, gaz), du déboisement mondial et de la production de ciment (cf. chap. 1.1 Introduction, p. 28).

<sup>3</sup> Sous l'effet du réchauffement, des surfaces recouvertes de glace et de neige se transforment en aires sans manteau blanc. Il s'ensuit une diminution de la réflexion du rayonnement solaire incident au profit d'une plus forte absorption de son énergie, avec pour conséquence un réchauffement encore plus intense. On parle d'une rétroaction positive.

<sup>1</sup> Le pH exprime le degré d'acidité sur une échelle logarithmique: un pH inférieur d'une unité correspond à une teneur en acide dix fois plus élevée.

altitude surtout, une décroissance de la couverture neigeuse comme conséquence de la hausse des températures. Il y a toutefois quelques régions où cette couverture croît; c'est le cas, par exemple, dans la partie septentrionale de la Norvège, où des précipitations plus abondantes ont entraîné une augmentation de la hauteur maximale de neige (IPCC 2013/WGI/Chap.4.5).

Le pergélisol se trouve principalement dans l'Arctique et en haute montagne. Ses changements dans les immenses plaines polaires de la Sibérie, du Canada et de l'Alaska suscitent une attention particulière. Dans ces régions arctiques, les stations de mesure relèvent, depuis 1980 environ, une augmentation des températures encore à une profondeur de 10 à 20 mètres (Romanovsky et al. 2010). Le dégel du pergélisol a de multiples impacts sur des systèmes naturels et humains (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80). Par exemple, les conditions hydrologiques peuvent subir de profonds changements dans les écosystèmes arctiques si des lacs entiers disparaissent ou que le lit de grandes rivières se déplace. Des routes, des voies ferrées et d'autres infrastructures, voire des agglomérations entières, sont de plus en plus confrontées à des problèmes de construction et d'entretien dus à un tassement ou à des mouvements du pergélisol sous-jacent. Des infrastructures comparables sont menacées en haute montagne notamment.

## Le niveau mondial de la mer monte

Des millions de personnes sont directement concernées par des changements du niveau de la mer. De 1901 à 2010, le niveau mondial de la mer s'est élevé d'environ 19 centimètres (fig. 1.21a, à gauche) (IPCC 2013/WGI/Chap.3 et Chap.13). La montée du niveau de la mer est causée avant tout par les processus suivants :

- le réchauffement des océans et la dilatation thermique de l'eau qui en résulte,
- la fonte des glaciers et des inlandsis et l'apport d'eau de fonte dans les océans et
- des modifications des réservoirs d'eau sur la terre ferme (par exemple des eaux souterraines, des lacs et des cours d'eau), dues à la construction de barrages et de bassins pour l'approvisionnement en eau et en énergie, à des installations agricoles d'irrigation ou à la baisse de la nappe phréatique consécutive à la production d'eau potable.

En revanche, les modifications de la banquise n'induisent pas de changements du niveau de la mer.

L'élévation du niveau de la mer, observée depuis le début des années 1970, est causée pour environ 75 pour cent par la dilatation thermique de l'eau des océans et par la

fonte des glaciers dans le monde. Aussi est-elle *très probablement* imputable au réchauffement anthropique (IPCC 2013/WGI/Chap.10 et Chap.13).

Pendant ces dernières années, l'élévation du niveau mondial de la mer s'est accélérée par rapport à celle à long terme de 1901 à 2010 (fig. 1.21a, à gauche) (IPCC 2013/WGI/Chap.3 et Chap.13). En comparaison historique aussi, le niveau de la mer monte rapidement en ce moment: il s'est élevé davantage depuis le milieu du XIX<sup>e</sup> siècle qu'en moyenne au cours des deux millénaires antérieurs (IPCC 2013/WGI/Chap.5 et Chap.13).

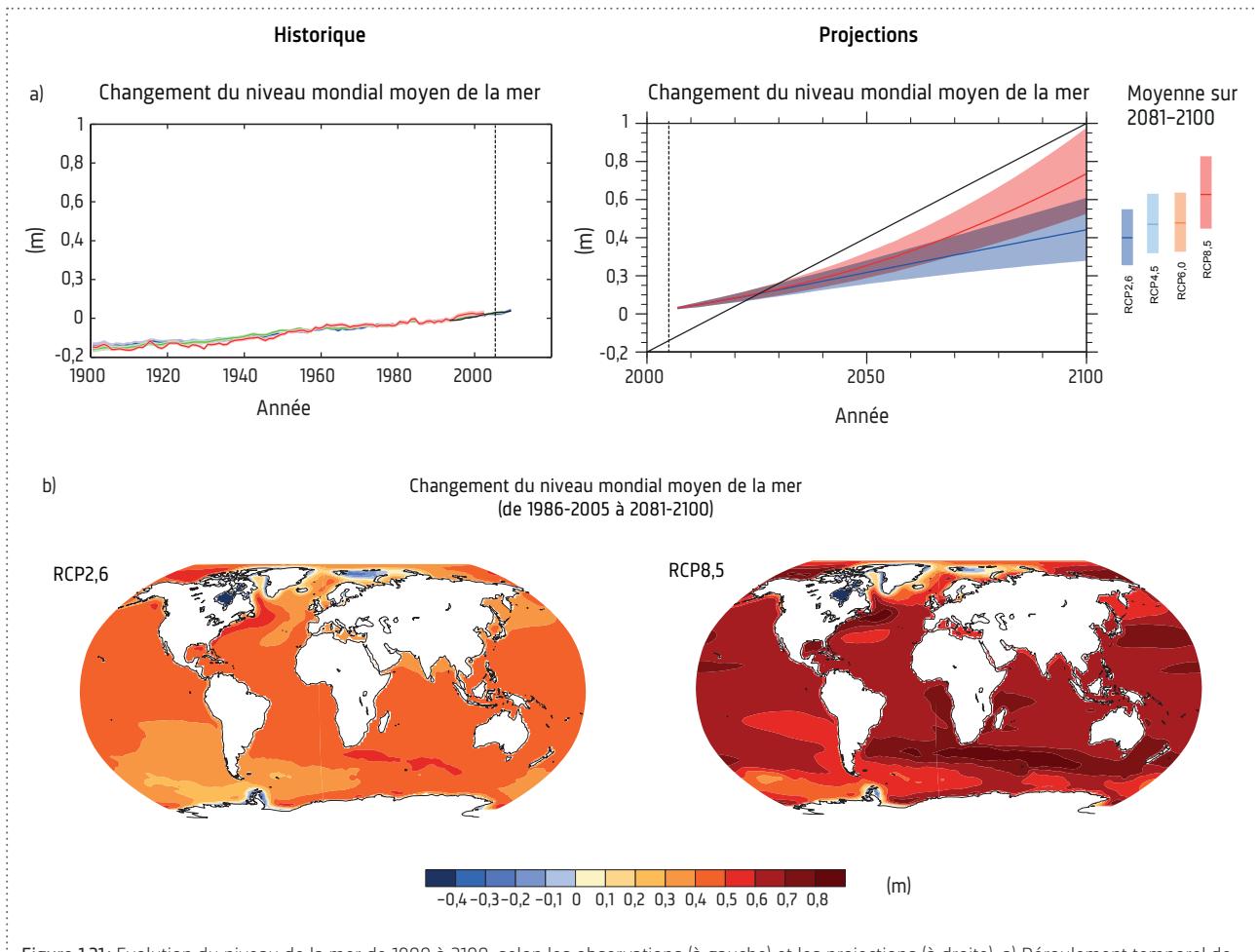
## Projections mondiales

Les changements futurs des océans, de l'étendue de la banquise et de la couverture neigeuse peuvent être évalués dans différents scénarios au moyen de modèles climatiques. En règle générale, glaciers et inlandsis sont modélisés indépendamment: à cet effet, des modèles dynamiques spécifiques sont appliqués aux scénarios climatiques. Les projections de l'élévation mondiale du niveau de la mer et du recul des glaciers ont été considérablement améliorées ces dernières années et incluent aujourd'hui tous les facteurs significatifs.

## Les océans : toujours plus chauds, toujours plus acides

Quel que soit le scénario (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38), l'océan global continuera de se réchauffer au XXI<sup>e</sup> siècle et au-delà. En raison de l'effet de la température sur la densité, le surcroît de chaleur influencera la stratification des masses d'eau et de plus en plus aussi les grands courants marins. Dans l'Atlantique, par exemple, il est *probable* que la circulation méridionale de renversement de l'Atlantique deviendra plus faible au XXI<sup>e</sup> siècle. Mais il est *très improbable* que cette circulation s'affaiblisse de façon abrupte ou s'arrête tout à fait au XXI<sup>e</sup> siècle. Toutefois, il n'est pas complètement exclu qu'elle s'effondre après 2100 dans le cas d'un réchauffement fort et persistant (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Grâce aux résultats de la recherche paléoclimatologique, on sait aujourd'hui que l'effondrement ou un affaiblissement prononcé de cette circulation conduirait à un refroidissement considérable de l'Europe et influencerait même le système climatique mondial (IPCC 2013/WGI/Chap.5).

Les océans absorberont, à l'avenir aussi, une part substantielle du CO<sub>2</sub> rejeté par les activités humaines et ralentiront ainsi le changement climatique anthropique. Mais en même temps, ils verront leur pH diminuer encore plus et



**Figure 1.21:** Evolution du niveau de la mer de 1900 à 2100, selon les observations (à gauche) et les projections (à droite). a) Déroulement temporel de l'élévation du niveau mondial de la mer. b) Structure géographique des changements du niveau de la mer. Depuis le début du XX<sup>e</sup> siècle, le niveau mondial de la mer est monté d'environ 19 centimètres. Il pourrait s'élever encore d'un multiple de cette valeur au cours du présent siècle, comme le montrent différents scénarios. Son élévation future dépend fortement de l'évolution à venir des émissions de gaz à effet de serre. La série historique (en haut à gauche) montre l'élévation moyenne mondiale du niveau de la mer pour différents ensembles de données et les domaines d'incertitude correspondants. Les séries de projections (en haut à droite) indiquent l'élévation moyenne mondiale du niveau de la mer au XXI<sup>e</sup> siècle; elles sont basées sur une combinaison de modèles climatiques et de modèles processuels des glaciers et des inlandsis. Les valeurs médianes sur la période de 2081 à 2100 et les incertitudes correspondantes sont représentées pour tous les scénarios RCP comme lignes horizontales et barres colorées verticales. (Source: IPCC 2013/WGI, combinaison des figures SPM.3, SPM.9, TS.22 et TS.23)

deviendront donc toujours plus acides (IPCC 2013/WGI/Chap.6).

### La cryosphère: recul de la glace, de la neige et du pergélisol

Avec la poursuite du réchauffement du système climatique (cf. chap. 1.6 La température, p. 40), la couverture de glace et de neige continuera de reculer dans le monde entier dans tous les scénarios considérés (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Les masses de glace des inlandsis diminueront encore plus. Et sur toute la planète, les glaciers s'amenuiseront encore davantage, c'est-à-dire perdront du volume et de la surface. D'ici la fin du XIX<sup>e</sup> siècle (période de 2081 à 2100 par rapport à celle de 1986 à 2005), la diminution du volume mondial des glaciers se situera entre 15 et 55 pour cent pour le scénario (dit d'atténuation) RCP2,6, qui prévoit une forte réduction des émissions, ou entre 35 et 85 pour cent pour le scénario (dit de référence) RCP8,5 sans mesures explicites de protection du climat (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

L'étendue et le volume de la banquise arctique continueront très probablement de diminuer. Dans le scénario de

référence RCP8,5, il est *probable* que l'océan Arctique sera presque libre de glace en septembre (le mois pendant lequel la banquise a sa plus faible étendue en moyenne pluriannuelle) encore avant le milieu du siècle. Les projections pour l'évolution de la banquise dans l'Antarctique sont très incertaines comparées à celles pour l'Arctique. On admet néanmoins que son étendue et son volume auront également diminué à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

La couverture neigeuse au printemps dans l'hémisphère Nord continuera *très probablement* de diminuer. L'ampleur de son recul jusqu'à la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (période de 2081 à 2100 par rapport à celle de 1986 à 2005) varie fortement selon le scénario : de 7 pour cent dans le scénario d'atténuation RCP2,6 et de 25 pour cent dans le scénario de référence RCP2,8 (IPCC 2013/WGI/Chap.12).

Avec la poursuite de la hausse des températures pendant le XXI<sup>e</sup> siècle, le pergélisol continuera lui aussi de se réchauffer et de diminuer (IPCC 2013/WGI/Chap.12). Les zones de pergélisol se trouvent avant tout dans l'Arctique et en haute montagne, donc dans les régions où les modèles climatiques prévoient le réchauffement le plus fort (cf. chap. 1.6 La température, p. 40). Les formations de pergélisol des régions arctiques contiennent souvent de grandes quantités de carbone. Lors du dégel du pergélisol, cet élément se dégage peu à peu sous forme de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) ainsi que de méthane ( $\text{CH}_4$ ), un gaz à effet de serre encore plus puissant. Ce processus est irréversible à l'échelle de temps de quelques centaines à plusieurs milliers d'années et pourrait renforcer considérablement le changement climatique. Cependant, les changements du pergélisol étant difficiles à quantifier avec des modèles climatiques, les projections à ce sujet sont incertaines.

## Le niveau de la mer : de plus en plus haut durant des siècles

Dans tous les scénarios, le niveau de la mer continue de monter pendant le XXI<sup>e</sup> siècle (fig. 1.21). A l'avenir, il s'élèvera *très probablement* encore plus vite qu'au cours des dernières décennies. Cela tient avant tout au réchauffement plus rapide des océans et à la perte croissante de masse des glaciers et des inlandsis. Le niveau de la mer étant influencé par des facteurs plus ou moins significatifs selon la région, son élévation n'aura pas partout la même ampleur (fig. 1.21b). Les particularités régionales du niveau de la mer associées au changement climatique prédomineront alors sur celles dues à la variabilité naturelle. Mais d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, le niveau de la mer montera clairement pratiquement partout (IPCC 2013/WGI/Chap.13).

Les projections de l'évolution du niveau de la mer indiquent, pour la fin du XXI<sup>e</sup> siècle (période de 2081 à 2100 par rapport à celle de 1986 à 2005), une élévation *probable* située entre 26 et 55 centimètres pour le scénario d'atténuation RCP2,6 et entre 45 et 82 centimètres pour le scénario de référence RCP8,5 (fig. 1.21a, à droite). Pendant le XXI<sup>e</sup> siècle, cette élévation est imputable principalement à la dilatation thermique due au réchauffement des océans et à la fonte des glaciers (IPCC 2013/WGI/Chap.13). En conséquence de la montée du niveau mondial de la mer, les événements extrêmes régionaux (par exemple les inondations lors de raz de marée) augmenteront *très probablement* (IPCC 2012/SREX/Chap.3; IPCC 2013/WGI/Chap.13).

En 2100, le niveau de la mer continue de monter dans toutes les projections – donc aussi dans le scénario d'atténuation RCP2,6 (fig. 1.21a, à droite). Aussi est-il *presque certain* qu'il poursuivra son ascension au-delà de 2100 et que celle-ci durera de nombreux siècles, parce que la dilatation thermique de l'eau des océans se fait au ralenti. C'est pourquoi l'on parle souvent d'un processus irréversible : même un arrêt immédiat et complet de la hausse de la température ne permettrait pas d'éviter la montée du niveau marin, causée par les émissions passées et présentes de  $\text{CO}_2$  et d'autres gaz à effet de serre.

Si elle perdure sur de plus longues échelles de temps, la perte de masse des inlandsis pourrait causer une élévation encore bien plus grande du niveau de la mer. Selon l'état actuel, encore limité, du savoir, un réchauffement entre environ un et quatre degrés Celsius par rapport à 1750 pourrait entraîner la disparition presque complète de l'inlandsis groenlandais. Ceci provoquerait une hausse du niveau de la mer allant jusqu'à sept mètres en l'espace d'un millénaire ou davantage. De tels niveaux des océans ont été atteints la dernière fois pendant la précédente période interglaciaire (de 129 000 à 116 000 années en arrière) et ont duré plusieurs millénaires (IPCC 2013/WGI/Chap.5 et Chap.13).

## La cryosphère : la situation en Suisse

Les changements des glaciers, de la neige et du pergélisol, constatés actuellement et attendus à l'avenir, ont beaucoup d'importance pour la Suisse. Ces dernières années, elle a fortement investi dans le suivi à long terme de la cryosphère et possède aujourd'hui des réseaux de mesure bien développés pour l'observation des glaciers, de la neige et du pergélisol. Les données ainsi récoltées sont de première importance pour élaborer un savoir détaillé sur l'état et les changements de la cryosphère en général et particulièrement en Suisse.

## Les glaciers: un recul rapide

Les glaciers des Alpes ont fondu continuellement et très rapidement depuis, surtout, le milieu des années 1980: en 2003, il en restait environ 2100 kilomètres carrés sur les 2900 qui existaient encore au milieu des années 1970 (Paul et al. 2011). De 1973 à 2010, la surface de glacier des Alpes suisses a reculé de 1300 à 940 kilomètres carrés (Fischer et al. 2014). La masse des glaciers diminue elle aussi de plus en plus vite: rapportée à une unité de surface (un mètre carré) et convertie en équivalents en eau (comme pour les précipitations), la perte nette était de 0,3 mètre par an avant 1980, de 0,6 mètre par an pendant les années 1990 et d'environ un mètre par an au cours des dix dernières années. Cette forte perte de masse a pour conséquences la décroissance des glaciers, la séparation de langues glaciaires et la formation de nouveaux lacs (ou l'agrandissement de lacs existants). Les glaciers réagissent, en Suisse aussi, de façon différée à l'augmentation de la température: leur étendue ne s'est pas encore adaptée à l'important réchauffement en cours depuis le milieu des années 1980. Aussi continueront-ils de s'amenuiser quelle que soit l'évolution future de la température, ce qui aura des conséquences pour l'économie hydraulique et énergétique suisse (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84). Pour les scénarios climatiques disponibles actuellement, les modélisations prévoient une diminution de la surface de glacier d'environ 20 à 50 pour cent jusqu'en 2050 et de 50 à 90 pour cent d'ici 2100 (chaque fois par rapport à l'an 2000) (Jouvet et al. 2011; Linsbauer et al. 2013). Conjointement à cette diminution de la surface, les glaciers subiront une réduction allant jusqu'à 90 pour cent de leur volume d'ici la fin du siècle. Si la hausse mondiale de la température peut être limitée à 2 degrés (par rapport au niveau préindustriel), les glaciers suisses perdront encore toujours environ 50 pour cent de leur volume jusqu'en 2050 et quelque 75 pour cent d'ici 2100 (Salzmann et al. 2012).

## La neige: la saison devient plus courte

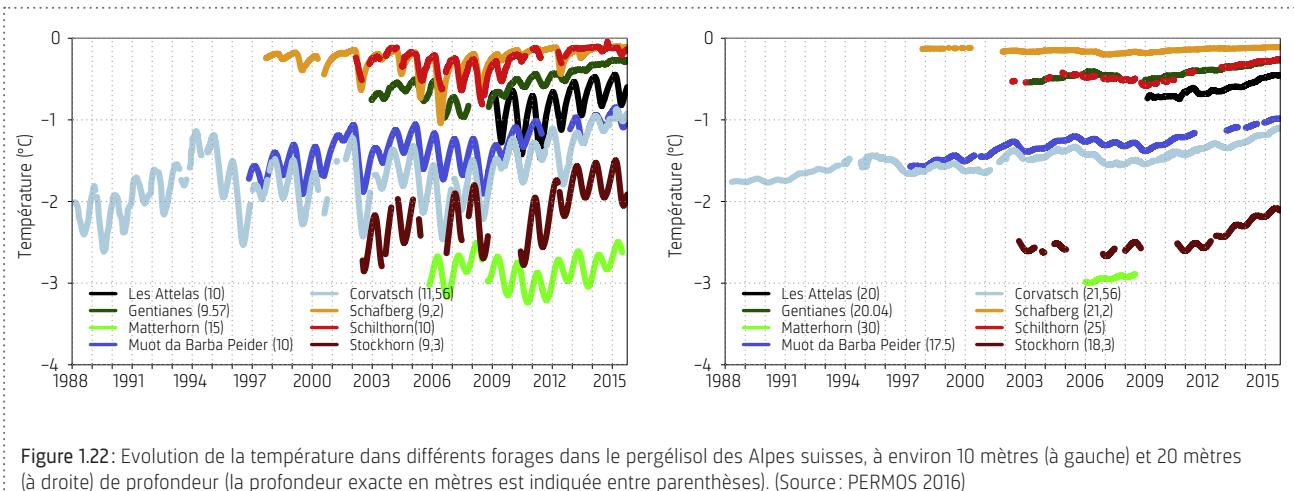
Parallèlement à l'augmentation de la température (cf. chap. 1.6 La température, p. 40), on a observé un net recul de la durée de l'enneigement sur le Plateau suisse au cours des dernières décennies (Marty 2008). Mais au-dessus de 2000 mètres d'altitude, les températures d'hiver continuent d'être majoritairement négatives, si bien que l'on n'a pas constaté jusqu'ici de changements significatifs de la durée et de l'épaisseur de la couverture neigeuse (Marty & Meister 2012).

A l'avenir, si la température de l'air continue d'augmenter, la limite inférieure d'une couverture neigeuse saisonnière se déplacera plus haut et la durée de l'enneigement

deviendra toujours plus courte à toutes les altitudes. Ces effets se renforceront au fur et à mesure du réchauffement. Dans l'hypothèse d'un scénario d'émission moyen, les projections des différents modèles climatiques prévoient que d'ici la fin du siècle, la saison de la neige se raccourcira, selon l'altitude, de quatre à huit semaines et que la limite de la couverture neigeuse se déplacera 500 à 700 mètres plus haut. La quantité d'eau stockée sous forme de neige pourrait être alors de jusqu'à deux tiers inférieure à aujourd'hui, ce qui aurait pour effet de diminuer l'écoulement, avant tout au printemps et en été (Schmucki et al. 2015). Ces projections présentent leur plus haut degré d'incertitude en haute montagne, où les précipitations hivernales pourraient, selon comment elles évoluent, compenser une partie de l'effet du réchauffement.

## Le pergélisol alpin: tendance au réchauffement

Les séries de mesures systématiques des températures du sous-sol dans les zones alpines de pergélisol sont encore relativement courtes. Ces relevés ont commencé vers la fin des années 1980 dans des glaciers rocheux (des corps sédimentaires gelés en mouvement très lent) et même seulement après le tournant du siècle dans des parois raides. Les données sur des tendances à long terme doivent donc être interprétées avec prudence. En Suisse, les plus grandes formations de pergélisol ont des températures situées entre moins trois et zéro degrés Celsius, donc peu au-dessous du point de fusion. De ce fait, le réchauffement de ces formations exige beaucoup plus d'énergie que lorsqu'elles sont plus froides, parce que la transformation de phase (de l'état solide à liquide) consomme en plus de l'énergie de fusion. Dans ces conditions, les tendances du réchauffement du pergélisol se manifestent moins clairement qu'à plus basses températures. Toutefois, on observe en différents endroits que la température augmente dans le sous-sol et que la couche affectée par le dégel annuel devient de plus en plus épaisse (PERMOS 2016). A part la hausse des températures du pergélisol, les vitesses avec lesquelles des glaciers rocheux se déplacent en aval augmentent souvent de façon substantielle et la proportion d'eau contenue sous forme liquide dans le sous-sol croît. Ce sont-là également deux indices d'un réchauffement ou d'une dégradation de la glace. Pendant les années 2010 notamment, les températures observées dans le pergélisol ont été constamment très chaudes dans la plupart des sites, comparées à celles relevées il y a une quinzaine d'années lorsqu'une très grande partie de ces mesures ont démarré (PERMOS 2016).



## Défis pour la recherche sur le climat

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2013/WGI) a confirmé que la cryosphère et les océans subissent actuellement des changements considérables et rapides. En Suisse aussi, surtout en haute montagne, la neige, les glaciers et le pergélisol ont déjà fortement réagi au changement climatique, et dans le cas des glaciers de façon bien visible. Les projections prévoient de nouvelles diminutions, éventuellement encore plus fortes, au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et au-delà. Aussi la Suisse doit-elle se préparer à faire face à de nouveaux paysages, peut-être sans glaciers, et aux conséquences de cette évolution – par exemple pour la gestion des eaux, l'approvisionnement énergétique, les infrastructures et le tourisme (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80). Des données d'observation plus nombreuses et de bonne qualité, satellites notamment, s'ajoutant à des modèles plus performants et à une meilleure compréhension des processus, ont facilité la quantification des changements dans le passé et des projections pour le futur et amélioré l'évaluation des incertitudes. Maintenant, de nombreux changements observés peuvent être mis sans équivoque en relation avec l'évolution anthropique du climat. Mais il est encore difficile de comparer quantitativement la variabilité naturelle et l'influence humaine.

Malgré ces progrès, des séries de mesures plus nombreuses, plus longues et de meilleure qualité sont nécessaires pour améliorer encore la compréhension des processus physiques et biochimiques et des changements prévus par les modèles climatiques. L'océan au-dessous de 2000 mètres de profondeur, par exemple, n'est encore étudié que de façon extrêmement lacunaire, ce qui empêche entre autres de mieux comprendre son rôle dans le ralentissement du réchauffement de l'atmosphère observé depuis 1998 (cf. chap. 1.6 La température, p. 40).

De même, la base de données (sur le carbone, l'oxygène, les substances nutritives etc.) significatives pour le cycle du carbone dans l'océan et pour les écosystèmes marins est encore très limitée, tant spatialement que temporellement. L'insuffisance de cette base de données – entre autres parce que les séries de mesures sont trop courtes – empêche de bien évaluer les changements de l'intensité de la circulation méridionale de renversement de l'Atlantique et donc de se prononcer sur l'avenir du Gulf Stream dans l'Atlantique Nord.

L'évaluation de la montée du niveau de la mer dans le passé et à l'avenir est entachée de grandes incertitudes. Il n'existe jusqu'ici aucune projection qui établit, par exemple, un lien direct entre l'évolution régionale de la température de l'océan et la dynamique des inlandsis, ou qui tient compte de la réaction de ces derniers à des changements climatiques réalisables. La quantification et le déroulement temporel des apports des inlandsis à l'élévation du niveau de la mer au cours du XXI<sup>e</sup> siècle et au-delà ne sont pas bien compris, pas plus que la distribution régionale des changements du niveau de la mer et que la fréquence et l'ampleur des niveaux records (par exemple lors de raz de marée). Mais pendant le XXI<sup>e</sup> siècle, selon l'état actuel du savoir et si l'on se réfère aux scénarios considérés ici, seul l'affondrement de parties de l'inlandsis antarctique pourrait faire monter substantiellement le niveau de la mer, c'est-à-dire de plusieurs décimètres (IPCC 2013/WGI/Chap.13). Pour protéger les régions côtières et planifier les mesures nécessaires à cette fin, il est essentiel de mieux comprendre tous ces facteurs en relation avec la montée du niveau de la mer.

## Bibliographie

- Fischer M, Huss M, Barboux C, Hoelzle M (2014) **The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: Relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers.** Arctic, Antarctic and Alpine Research 46: 933–945.
- IPCC (2012) Special Report «**Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**» (SREX). Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 3 «Observations: Ocean». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 4 «Observations: Cryosphere». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 10 «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 12 «Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI).** Chapter 13 «Sea Level Change». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 6 «Ocean systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Jouvet G, Huss M, Funk M, Blatter H (2011) **Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate.** Journal of Glaciology 57: 1033–1045.
- Linsbauer A, Paul F, Machguth H, Haeberli W (2013) **Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps.** Annals of Glaciology 54: 241–253.
- Marty C (2008) **Regime shift of snow days in Switzerland.** Geophysical Research Letters 35: L12501.
- Marty C, Meister R (2012) **Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps.** Theoretical and Applied Climatology 110: 573–583.
- Paul F, Frey H, Le Bris R (2011) **A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results.** Annals of Glaciology 52: 144–152.
- PERMOS (2016) **Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014.** Noetzli J, Luethi R, Staub B (eds.). Glaciological Report (Permafrost) No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Romanovsky VE, Smith SL, Christiansen HH (2010) **Permafrost thermal state in the polar Northern Hemisphere during the International Polar Year 2007–2009: A Synthesis.** Permafrost Periglacial Processes 21: 106–116.
- Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glaciers' response to the global «2°C air temperature target».** Environmental Research Letters 7: 044001.
- Schmucki E, Marty C, Fierz C, Lehning M (2015) **Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs.** International Journal of Climatology 35: 3262–3273.



Photo: Thierry Lachat

## Partie 2: Incidence et adaptation

### Auteures et auteurs

#### Prof. Dr Konstantinos Boulouchos

Professeur, Laboratoire d'aérothermochimie et de systèmes de combustion de l'Institut de technique énergétique (IET) de l'EPF de Zurich

#### Prof. Dr David N. Bresch

Professeur en risques météorologiques et climatiques, Institut pour les décisions environnementales (IED) de l'EPF de Zurich et Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse)

Jusqu'en juin 2016: Responsable des partenariats mondiaux pour le développement des affaires chez Swiss Re, Zurich

#### Prof. Dr Harald Bugmann

Professeur d'écologie forestière à l'Institut des écosystèmes terrestres (ITES) de l'EPF de Zurich

#### Prof. Dr Reynald Delaloye

Professeur de géographie physique, Département des géosciences de l'Université de Fribourg

#### Sabine Döbeli

PDG de Swiss Sustainable Finance, Zurich

#### Prof. Dr Markus Fischer

Directeur de l'Institut des sciences végétales de l'Université de Berne

#### Prof. Dr Jürg Fuhrer

Responsable du groupe de recherche « Climat et hygiène de l'air » de l'Agroscope, Zurich

#### Prof. Dr em. Wilfried Haeberli

Professeur (émérite) de géographie, spécialiste de géographie physique, Institut de géographie de l'Université de Zurich

#### Prof. Dr Martin Hoelzel

Professeur de géographie physique, Département des géosciences de l'Université de Fribourg

#### Dr Roland Hohmann

Chef de la section Rapports climatiques et adaptation aux changements de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

#### PD Dr Christian Huggel

Chercheur senior, Conséquences climatiques, risques et adaptation aux changements, groupe de recherche « glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich.

#### PD Dr Margreth Keiler

Maître de conférences en géomorphologie, risques naturels et recherche sur les risques à l'Institut de géographie de l'Université de Berne

#### Prof. em. Dr DDr h.c. Christian Körner

Professeur (émérite) de botanique, Département des sciences de l'environnement de l'Université de Bâle

#### Isabelle Kull

Cheffe de projet chez GEOTEST AG, Zollikofen

#### Prof. Dr Nino Künzli

Professeur de médecine sociale et préventive à l'Institut tropical et de santé publique suisse de l'Université de Bâle

#### Dr Therese Lehmann Friedli

Responsable adjointe de l'Unité de recherche en tourisme (CRED-T), Centre de développement régional de l'Université de Berne

#### Prof. Dr Olivia Martius

Professeure spécialiste des conséquences climatiques, Institut de géographie du Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

#### Dr Christoph Marty

Collaborateur scientifique, Neige et pergélisol, Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF), Davos Dorf

#### Gabriele Müller-Ferch

Collaboratrice scientifique, ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

#### Lea Müller

Expert en risques naturels chez Swiss Re, Zurich

#### Dr Jeannette Nötzli

Collaboratrice scientifique, Neige et pergélisol, WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF), Davos Dorf  
Jusqu'en juillet 2015: Maître-assistante, groupe de recherche « Glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich

#### Prof. Dr Anthony Patt

Professeur en protection du climat et adaptation aux changements à l'Institut pour les décisions environnementales (IED) de l'EPF de Zurich

#### Dr Frank Paul

Chercheur senior, groupe de recherche « Glaciologie et géomorphodynamique », Institut de géographie de l'Université de Zurich

#### Prof. Dr Etienne Piguet

Professeur de géographie des mobilités à l'Institut de géographie de l'Université de Neuchâtel

#### Dr Marco Pütz

Responsable du groupe de recherche « Economie et développement régionaux » de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

#### Prof. Dr Christoph C. Raible

Professeur de physique climatique et environnementale à l'Institut de physique de l'Université de Berne

#### Prof. Dr Martine Rebetez

Professeure de climatologie appliquée à l'Institut de géographie de l'Université de Neuchâtel  
Chercheuse senior, cheffe de l'unité de recherche « Dynamique forestière et climat » de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

#### Dr Andreas Rigling

Responsable de l'unité de recherche « Dynamique forestière » de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

#### Dr Christoph Ritz

Jusqu'en mars 2016: Directeur de ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

#### Dr Ole Rössler

Post-doctorant, groupe de recherche « Hydrologie », Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

#### Dr Nadine Salzmann

Chercheuse senior et maître de conférences, Département des géosciences de l'Université de Fribourg

#### Dr Yvonne Schaub

Vice-présidente, Médecine et sciences naturelles, Université de Zurich  
Jusqu'en mai 2015: doctorante en géographie physique, Institut de géographie de l'Université de Zurich

#### Dr Eva Spehn

Collaboratrice scientifique, Forum Biodiversité, Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne  
Directrice de Global Mountain Biodiversity Assessment (GMBA), Institut des sciences végétales de l'Université de Berne

#### Dr Kuno Strassmann

Coordinateur du projet Consortium CH2018, Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich  
Jusqu'en juin 2016: Spécialiste de la protection du climat, Office pour les déchets, les eaux, l'énergie et l'air (ODEEA), canton de Zurich  
Jusqu'en avril 2014: Collaborateur scientifique, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

#### Prof. Dr Rolf Weingartner

Professeur d'hydrologie, Institut de géographie, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

#### Mark Zimmermann

Chef du département NEST (« Next Evolution in Sustainable Building Technologies »), Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherches (LFEM), Dübendorf

#### Dr Markus Zimmermann

Collaborateur scientifique, Institut de géographie de l'Université de Berne  
Expert en gestion des risques et des menaces, directeur du bureau d'études géographiques NDR Consulting GmbH, Thoune

## Défis pour la recherche, la pratique et la société en lien avec les risques naturels causés par le climat – étude de cas à Haslital (canton de Berne)

Les processus géomorphologiques dans la zone du Spreitgraben dans la commune de Guttannen BE illustrent de façon impressionnante les conséquences du changement climatique observées depuis environ 30 ans de manière récurrente dans la cryosphère alpine et particulièrement visibles ces 10 à 15 dernières années. Les nombreuses coulées de boue apparues au Spreitgraben entre 2009 et 2011 ont été causées par des modifications des conditions du pergélisol au Ritzlihorn. Depuis 2012, le nombre de coulées de boue a certes reculé, une nouvelle intensification de celles-ci est pourtant attendue (peut-être moins conséquente). Les énormes dépôts de matériaux charriés dans l'Aar et la mise en danger en perpétuelle évolution d'habitats et d'infrastructures représentent des exigences élevées dans le cadre de la gestion des dangers et des risques. Le système de surveillance et d'alerte précoce installé en 2009 a pu être vérifié et amélioré plusieurs fois déjà quant à sa fonctionnalité grâce à la densité élevée d'événements. Dans le cadre de la gestion de ces risques, les instruments correspondants en matière d'aménagement du territoire ont pourtant manqué. Les décideurs au niveau du canton et de la commune sont appelés à développer des solutions pertinentes tenant compte des incertitudes présentes et conduisant à l'acceptation des mesures d'adaptation nécessaires au niveau local.

*Isabelle Kull (GEOTEST SA), Markus Zimmermann (NDR Consulting GmbH et Université de Berne)*

La commune de Guttannen dans l'Oberland bernois oriental se situe à environ 1050 mètres d'altitude; elle est entouré de montagnes élevées. Les dangers naturels constituent un élément important de l'histoire du village. Le cône de déjection important apparu suite à la dernière ère glaciaire, au pied duquel Guttannen se situe, témoigne de dépôts récurrents de coulées de boue, d'avalanches et de chutes de pierres issus des temps passés.

Au cours des années 2009 et 2010, des éboulements importants ont eu lieu au Ritzlihorn (3263 mètres d'altitude), situé à l'ouest du village de Guttannen. Ces chutes de pierres ont entraîné des modifications considérables au niveau de l'évolution des processus dans le système de coulées de boue du Spreitgraben et ont conduit à court terme à un changement de système: alors que les coulées de boue étaient rares jusqu'ici, celles qui se sont produites annuellement et de manière récurrente depuis ces éboulements présentent une ampleur sans précédent. De ce fait, près de 650 000 mètres cubes de débris ont été déposés au total dans l'Aar entre 2009 et 2011, parmi ceux-ci des blocs rocheux énormes (GEOTEST 2012). Des érosions massives au niveau du cône et des alluvionnements énormes au fond de la vallée ont mis en danger les zones urbanisées ainsi que l'infrastructure. Depuis 2012, l'activité des coulées de boue a retrouvé un niveau normal.

### Processus déclencheurs et chaînes de processus au Ritzlihorn

Le flanc nord abrupt du Ritzlihorn, constitué de gneiss schisteux et sensibles à la météorisation, se situe dans le pergélisol, comme le montre la carte de l'extension potentielle du pergélisol en Suisse (OFEV 2005, Gruber 2012). Des observations de terrain et des mesures de la température de base de la couverture neigeuse l'ont confirmé. La zone de déclenchement des éboulements était située selon toute probabilité dans le pergélisol en cours de dégradation (Hasler et al. 2011). Les premières coulées de boue ont pris naissance dans les dépôts frais de chutes de pierres et ont causé une forte érosion en profondeur au niveau du cône du Spreitgraben. En raison des coulées de boue, des canaux d'écoulement se sont formés en-dessous des champs de névé dans la partie amont du cône de déjection; des embâcles sont apparus au niveau des canaux d'écoulement. Des percées de tels embâcles renforcent l'érosion déclenchée par les coulées de boue. Le névé a été creusé sur une longue distance en raison de la fragmentation et de l'affouillement mécaniques de celui-ci, jusqu'à ce qu'il s'effondre finalement complètement et libère de nouveaux foyers d'éboulis sujets à l'érosion.

Les masses rocheuses meubles recouvertes jusqu'à présent de neige et partiellement gelées ont été alors soumises directement aux intempéries et aux apports de chaleur, ce qui a en outre augmenté la présence d'éboulis. Un hiver pauvre en neige (2010/2011) ainsi que des températures de l'air élevées et de fortes précipitations au cours de l'été



**Figure 2.1:** Ritzlihorn avec Spreitgraben et zones d'érosion (en bleu) et de dépôt (en orange) actuelles. A droite: illustrations le long du fossé.  
(Source: GEOTEST 2012)

2011 ont contribué à la poursuite de la dégradation et à la mise au jour des fossés qui étaient recouverts partiellement par le névé depuis des dizaines d'années (ou, le cas échéant, depuis des centaines d'années).

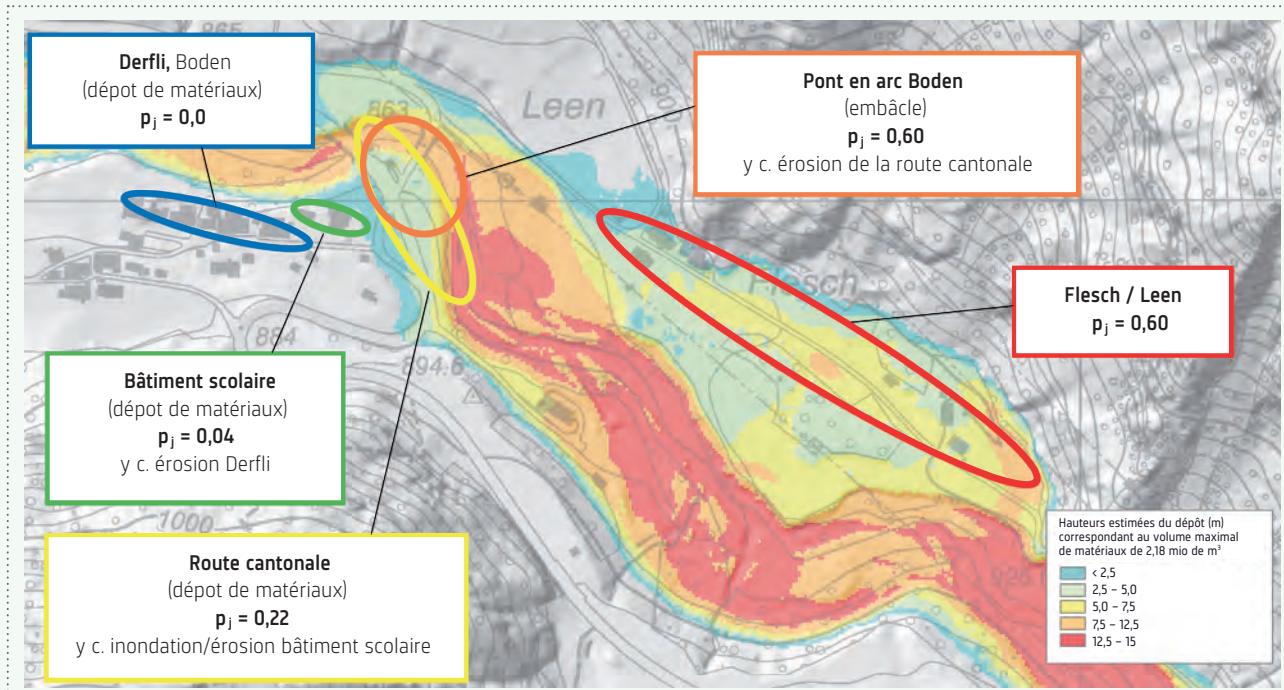
### Facteurs météorologiques provoquant les coulées de boue

Outre les précipitations directes, la quantité de neige, la température de l'air et la saturation en eau du substrat en particulier faisaient partie des principaux facteurs d'influence météorologiques ayant déclenché les coulées de boue. Ces facteurs ont eu une influence élevée sur le dégel du pergélisol et du névé dans le bassin et donc sur la disponibilité d'éboulis facilement mobilisables.

### Nouvelle chaîne de processus – vraisemblablement déclenchée par le changement climatique

Cette chaîne de processus représente un phénomène exceptionnel, probablement d'origine climatique, pour lequel on ne connaît jusqu'à présent aucun parallèle historique dans le Spreitgraben. Le système de coulées de boue marqué par la période périglaciaire paraît réagir non seulement à des modifications climatiques au sens d'événements extrêmes, mais en particulier à des modifications progressives de température, conditionnées par le changement climatique et conduisant à une dégradation du pergélisol et du névé.

Le Spreitgraben ne constitue pas un cas isolé: sur le côté opposé, dans le bassin de la Rotlouwi, des événements météorologiques extrêmes ont conduit à d'importantes coulées de boue en 2005 et en 2011. Dans la partie centrale de l'arc alpin, une intensification des coulées de boue causées par la dégradation du pergélisol a également pu



être constatée durant les fameuses intempéries de 1987 (Zimmermann & Haeberli 1992).

Aussi bien les coulées de boue du Spreitgraben que celles de la Rotlouwi indiquent que les systèmes de coulées de boue réagissent, selon le caractère du bassin, de façon extrêmement sensible aux modifications de processus conditionnées par le climat. Ce phénomène a pu être également constaté dans l'arc alpin central durant les intempéries de 1987 (Zimmermann & Haeberli 1992).

## Impacts et adaptations

Durant les trois années d'événements, la galerie paravalanche ainsi que le gazoduc international ont à nouveau été menacés par la formation d'affouillements et de percements de blocs dans la zone de la route cantonale de Guttannen. Une habitation et une écurie situées directement face à l'embouchure du Spreitgraben dans l'Aar ont été gravement menacées par des coulées de boue; l'habitation datait du XVIII siècle et se trouvait jusqu'ici à quelque 20 mètres au-dessus du lit de l'Aar. Plus en aval, des coulées de boue et des inondations ont mis à nu le gazoduc, compromettant ainsi sa sécurité. Au cours de la dernière année d'événements, les dépôts de coulées de boue dans l'Aar se sont rapprochés de façon menaçante de la STEP de Guttannen et d'un mât de la ligne à haute tension. Des alluvionnements dans l'Aar au niveau du tronçon des groupes de maisons de Flesch, Leen et de Boden (situées à près d'un kilomètre en-dessous

de l'embouchure du Spreitgraben dans l'Aar) ont en outre entraîné des risques d'inondation accrus.

## Mises en œuvre de mesures de protection étendues

Afin de remédier au danger, des mesures de protection étendues ont été mises en œuvre contre les dommages potentiels mentionnés ci-dessus: comme première mesure, un système d'alerte précoce et d'alarme de haute technologie a été mis en place pour l'exploitation routière, les chantiers en aval et les habitants concernés. Dans le domaine de l'affouillement en-dessous de la galerie d'avalanches et du gazoduc de transit, le lit de la rivière a également pu être rempli après plusieurs essais de stabilisation au cours du semestre d'hiver 2010/2011 et a été stabilisé grâce à une structure constituée de poutres métalliques et de gros blocs. En 2011, les bâtiments gravement menacés situés en face de l'embouchure ont dû être abandonnés. Les personnes ont été déplacées, les bâtiments abandonnés. Comme mesure de protection supplémentaire, le gazoduc a été transféré au prix d'efforts considérables vers le côté opposé de la vallée, dans la zone de l'embouchure du Spreitgraben dans l'Aar. Des digues ont été érigées afin de protéger la STEP de l'avancée continue des dépôts de coulées de boue ainsi que de l'érosion locale.

Les adaptations aux modifications de processus actuelles ont coûté près de 50 millions de francs, dont 34 millions

rien que sécuriser le gazoduc. Si de nouveaux événements de l'ampleur de ceux de 2010/2011 devaient avoir lieu, d'autres zones urbaines de Guttannen (Flesch, Leen et Boden) de même que la route cantonale pourraient se trouver dans la zone d'érosion et de dépôt; cela impliquerait d'autres mesures d'adaptation et des coûts élevés pour les personnes privées et les pouvoirs publics.

## Stratégies d'action face aux modifications de processus dictées par le climat

En raison du changement climatique, on peut s'attendre à l'amplification de la fréquence ainsi que de l'intensité et de l'étendue géographique de processus tels que ceux ayant eu lieu au Spreitgraben.

De nouveaux déroulements de processus et sources de danger peuvent également apparaître dans d'autres régions, de manière similaire à ceux du Haslital. Leurs conséquences possibles sont difficilement évaluables actuellement, celles-ci se trouvant souvent en dehors de l'expérience historique. Les grosses difficultés se trouvent dans la définition de scénarios, de cascades d'événements, de situations de risque et finalement de dangers et de risques. La complexité des interactions, les parallèles historiques manquants et le caractère des modifications de processus d'origine climatique entraînant une modification du paysage rendent difficile la détermination de leurs probabilités d'occurrence futures. Sur la base de ces incertitudes, il n'était jusqu'à présent pas possible d'effectuer une évaluation du danger en réalisant une carte des dangers pour les espaces de processus potentiels dans la région de Guttannen/Boden. Au lieu de cela, des scénarios catastrophes ont prioritairement été conçus. Sans carte de danger, il était toutefois difficile pour la commune de réglementer la gestion des constructions dans la zone dangereuse au sens du droit de la construction ou de prendre des décisions fondamentales concernant l'utilisation future de cette zone.

## Ebauche de solution

Une ébauche de solution, fondée sur différentes probabilités d'occurrence de processus, d'évolutions de processus (cascades) et de dommages consécutifs (GEOTEST & NDR 2014) a été élaborée pour Guttannen et offre une nouvelle approche de tels incertitudes et risques d'origine climatique. Les probabilités de processus se basent sur des combinaisons possibles de déroulements de processus.

Cette procédure doit permettre d'estimer la probabilité de dommages pendant une durée déterminée pour des objets potentiellement menacés. Dans le cas de Guttannen,

cette durée basée sur la durée d'amortissement des transformations de bâtiments est d'environ 25 ans.. L'objectif de cette approche consiste à mettre à disposition des autorités locales et cantonales ainsi que des assurances les bases nécessaires pour les décisions de planification (p.ex. pour l'aménagement du territoire et le développement de l'infrastructure) et pour l'assurance de bâtiments et d'installations.

En fonction de la probabilité du processus et des dommages pronostiqués dans la zone d'habitation, il existe diverses possibilités en matière d'aménagement du territoire pour gérer la menace: une relocalisation en cas de danger très important (déjà appliquée au groupe de maisons en face de l'embouchure du Spreitgraben), un développement limité du milieu bâti en cas de danger moyen ou un développement illimité du milieu bâti en cas de danger très faible.

A Guttannen, l'analyse probabiliste a été effectuée pour trois groupes différents de maisons, selon un horizon temporel de 25 ans. Les résultats de l'analyse ont montré que

- dans le cas de deux groupes de maisons (Flesch et Leen), il faut compter avec une probabilité de dommage élevée de 60 pour cent. Cela signifie également qu'aucun dommage ne surviendra avec une probabilité de 40 pour cent au cours de ces 25 prochaines années.
- dans le cas de la route cantonale, la probabilité de dommage se situe à 22 pour cent.
- dans le cas de deux objets (bâtiment scolaire), il faut compter avec une faible probabilité de dommage (0,04 pour cent).
- à Derfli (hameau de Boden), il ne faut s'attendre à aucun dommage.

Les résultats de l'analyse sont représentés spatialement sur la carte à la figure 2.2.

## Bibliographie

- GEOTEST (2012) **Guttannen, Murgang Spreitlou - Analyse und Prognose.** Rapport No. 1409237.3.
- GEOTEST, NDR (2014) **Guttannen, Spreitgraben - Ereigniswahrscheinlichkeiten.** Grundlagen für eine Risikoevaluation. Rapport No. 1414046.1.
- Gruber S (2012) **Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation.** In: Bamber L, Gruber S, Gudmundsson GH, Van den Broeke M (eds.), The Cryosphere 6: 221–233.
- Hasler A, Gruber S, Haeberli W (2011) **Temperature variability and offset in steep alpine rock and ice faces.** In Bamber L, Gruber S, Gudmundsson GH, Van den Broeke M (eds.), The Cryosphere 5: 977–988.
- OFEV (2005) **Carte de l'extension potentielle du pergélisol en Suisse.** www.bafu.admin.ch/dangers-naturels
- Zimmermann M, Haeberli W (1992) **Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas.** A case study in the Swiss Alps. Catena Supplement 22: 59–72.

## 2.1 Introduction

**Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC indique que les changements climatiques ont déjà produit des effets au cours des dernières décennies sur les systèmes naturels et anthropiques, sur l'ensemble des continents et des océans. Il est généralement admis que, plus la planète se réchauffe, plus les conséquences du réchauffement seront prononcées et plus les risques sont élevés. Ce constat n'est pas neuf, puisqu'il apparaissait déjà dans les rapports d'évaluation précédents du GIEC. Ce qui est nouveau, en revanche, dans le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, c'est l'approche des risques et de la manière de les éviter ou de les réduire – le cas échéant, au moyen de mesures d'adaptation appropriées. Il recourt pour cela à une analyse de risque qui intègre également les facteurs socioéconomiques, en plus des facteurs climatiques.**

*Christian Huggel (Université de Zurich), Christoph C. Raible (Université de Berne),  
Kuno Strassmann (ODEEA Zurich, \*aujourd'hui EPF de Zurich), Gabriele Müller-Ferch (SCNAT/ProClim)*

### Les effets du climat observés et leur rôle pour les estimations futures

La fonte des glaciers est l'un des indicateurs les plus significatifs des changements climatiques. Les glaciers des Alpes suisses connaissent une fonte continue et très rapide surtout depuis le milieu des années 1980 (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80). Les écosystèmes terrestres et marins montrent déjà des changements eux aussi. De nombreuses espèces ont vu se modifier leur répartition géographique, leurs activités saisonnières, leurs modèles de migration, leurs fréquences et leurs interactions (cf. chap. 2.8 La biodiversité et les services écosystémiques, p. 100, chap. 2.9 La forêt, p. 106, chap. 2.7 Ecosystemes alpins, p. 96). Ces observations constituent un élément essentiel pour une meilleure compréhension de la nature, de l'intensité et de la rapidité des conséquences des changements climatiques. Les observations de ces conséquences remontent plus ou moins loin dans le passé. La plupart du temps, on ne dispose de données que pour les dernières décennies. Outre les mesures climatologiques pures, telles que la température ou les précipitations, ces données reflètent aussi les évolutions des écosystèmes et de l'environnement façonné par l'homme et révèlent ainsi de manière empirique les rapports entre le climat et ses conséquences. Compte tenu des nombreux facteurs non climatiques qui agissent également sur ces systèmes, comme l'utilisation des terres, c'est pour la science un grand défi que d'attribuer la cause des évolutions observées aux changements climatiques (*Attribution*). La compréhension des processus des changements du passé, qui aura été corroborée par les observations, peut être exploitée au moyen de modèles d'impacts climatiques pour arriver à des prévisions sur l'évolution future des conséquences des changements climatiques (cf. Partie 1 : Fondements scientifiques, p. 21).

### Les conséquences des changements climatiques engendrent des risques

Les effets du climat entraînent des risques pour les systèmes naturels et anthropiques. A la différence du rapport précédent, le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC aborde résolument la problématique climatique du point de vue des risques. Le risque se définit comme l'interaction entre aléa (*Hazards*), exposition (*Exposure*) et vulnérabilité (*Vulnerability*) (cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77). La nouvelle analyse du risque intègre aussi, en plus des facteurs climatiques, des facteurs socioéconomiques tels que les inégalités ou la pauvreté. Cette approche tient compte de la complexité de la problématique climatique, mais conduit à plus d'incertitudes dans les estimations.

Le rapport d'évaluation du GIEC relève différents risques principaux dus aux graves dangers ou aux fortes vulnérabilités des sociétés et systèmes exposés. Le monde sera affecté par les risques principaux dans des proportions différentes ; il y aura des perdants et des gagnants. A l'échelle mondiale, l'aléa de la sécurité alimentaire fait partie, surtout dans les régions plus démunies, des conséquences potentiellement graves, au même titre que la menace des régions côtières par les ondes de tempête et par l'élévation du niveau de la mer (cf. chap. 2.16 La migration dans le réseau d'interdépendances globales, p. 136, chap. 2.13 L'espace urbain, p. 126). La réduction de la disponibilité de l'eau est considérée comme un risque principal dans le sud de l'Europe, mais elle pourra aussi devenir d'actualité en Suisse si aucune adaptation n'est entreprise sous la forme d'une gestion intégrée de l'eau (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84, chap. 2.10 L'agriculture, p. 111). Il en est de même pour les vagues de chaleur extrême qui, sans adaptation, pourraient avoir des incidences sur la santé et causer des dommages à l'économie, également dans notre pays (cf. chap. 2.15 Santé, p. 132, chap. 2.13 L'espace urbain, p. 126). D'autres catastrophes naturelles telles que les inon-

## Conséquences et adaptations aux changements climatiques : les activités de recherche en Suisse

Les rapports d'évaluation du GIEC s'adressent en premier lieu à un public mondial. Afin de pouvoir dresser une image cohérente et actuelle de la Suisse, les différents chapitres de ce rapport prendront en considération des constats additionnels provenant des activités de recherche suisses. Parmi les programmes les plus importants, nous pouvons citer les suivants :

**Programme de recherche « Forêt et changements climatiques »**  
Les objectifs du programme de recherche lancé en 2009 par l'OFEV et le WSL consistent à déterminer comment les changements climatiques se répercutent sur la forêt et les prestations forestières, et par quelles mesures d'adaptation ces dernières peuvent être assurées. Les résultats des recherches doivent permettre aux acteurs concernés – services forestiers, propriétaires de forêts, décideurs politiques – d'évaluer correctement les risques liés aux changements climatiques et la capacité d'adaptation des forêts, et de prendre des mesures d'adaptation efficaces là où elles sont nécessaires. Ces résultats alimentent en outre la « Stratégie nationale d'adaptation aux changements climatiques » du Conseil fédéral (OFEV 2012 & 2014) et doivent soutenir la mise en œuvre politique des objectifs de la « Politique forestière 2020 » (OFEV 2015) (cf. chap. 2.9 La forêt, p. 106).

### Programme national de recherche « Gestion durable de l'eau » (PNR 61)

De 2010 à 2013, le PNR 61 (2015) a jeté les bases scientifiques et élaboré des méthodes pour une gestion durable des ressources en eau, soumises à une pression de plus en plus forte. Les répercussions des changements climatiques et sociétaux sur les ressources en eau ont également été analysées. Les risques et conflits potentiels ont été identifiés, et des stratégies de gestion durable et intégrée des ressources hydriques ont été développées (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84).

### ACQWA (Assessing Climate Impacts on the Quality and Quantity of Water)

De 2008 à 2013, le projet de l'Union européenne ACQWA s'est penché sur les changements climatiques et les ressources en eau dans différentes régions de Suisse. Sur la base de données de modèles climatiques et de différents modèles d'offre et de demande de l'eau, des stratégies d'adaptation ont été développées dans différents secteurs économiques et politiques déterminants (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84).

### Pôle de recherche national « Climat »

De 2001 à 2013, plus de 200 chercheuses et chercheurs ont travaillé dans douze institutions à travers la Suisse autour du « NCCR Climate ». Le programme a généré plus de 800 articles scientifiques publiés dans des revues spécialisées internationales (peer-reviewed). Les recherches ont été menées dans les

domaine du climat du passé (variabilité, tendances et événements extrêmes), du climat du futur (processus et prévisions), des conséquences de la variabilité du climat et des changements climatiques, ainsi que de l'évaluation et de la couverture des risques et des réponses socioéconomiques. Ce Pôle de recherche national a donné naissance à deux centres de recherche : le Centre Oeschger de recherche sur le changement climatique (OCCR) de l'Université de Berne et le Centre de modélisation de systèmes climatiques (C2SM) de l'EPF de Zurich, de MétéoSuisse, de l'Empa, du WSL et de l'Agroscope.

### Changement climatique et hydrologie en Suisse (CCHydro)

Le projet CCHydro (2009-2012) de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) s'est penché sur les conséquences du changement climatique sur les ressources en eau de la Suisse jusqu'à l'horizon 2100, en incluant une répartition spatiale des phénomènes d'ici à 2050. Les résultats montrent que ce sont surtout les régimes saisonniers des débits qui connaîtront d'importants changements, avec une augmentation probable des inondations, mais aussi, et surtout, des périodes d'étiage (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84).

### Initiative CH2014-Impacts

Les scénarios du changement climatique les plus récents pour la Suisse (scénarios CH2011 ; les scénarios sont actuellement mis à jour dans le cadre du thème prioritaire CH2018) et les modèles des conséquences du changement climatique développés ces dernières années ont débouché sur l'initiative CH2014-Impacts et la quantification des conséquences du changement climatique en Suisse (CH2014-Impacts 2014). Ce rapport contient une série d'études sur les conséquences du changement climatique, qui traitent aussi bien des modifications des conditions environnementales que de leurs répercussions économiques et sociétales, par exemple sur l'agriculture ou la consommation d'énergie. Trois horizons temporels (2030, 2060, 2080) ont été abordés afin de tenir compte, d'une part, des exigences en matière de décisions de planification et de gestion et, d'autre part, des échelles de temps pertinentes en fonction de la conséquence du changement climatique traitée.

### Autres activités

Au-delà des projets cités, l'ensemble des hautes écoles suisses sont impliquées dans le domaine de la recherche sur le climat. Des activités liées à la recherche sont également en cours, à l'initiative de la Confédération. Citons parmi elles le programme pilote Adaptation aux changements climatiques et l'Analyse des risques et des opportunités liés aux changements climatiques de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

dations, la grêle, les glissements de terrain ou les chutes de rochers peuvent représenter une menace pour la population et porter préjudice à l'économie en Suisse (cf. chap. 2.17 L'industrie de l'assurance et des services financiers, p. 139, chap. 2.6 Dangers naturels provoqués par des changements du système climatique : chaînes de processus et risques complexes, p. 92, chap. 2.12 Bâtiments et infrastructures, p. 121, chap. 2.11 Tourisme, p. 117).

## Une adaptation optimale peut réduire les risques

Au cours de l'histoire, les hommes et les sociétés se sont toujours adaptés au climat, à ses variations et à ses événements extrêmes, et ce, avec plus ou moins de succès. Les nouveaux rapports d'évaluation du GIEC font apparaître encore plus clairement combien le climat, les effets du climat, les risques, l'adaptation et l'atténuation sont étroitement liés (cf. Partie 3: Atténuation, p. 149), et comment bien les approches fructueuses doivent adopter une perspective d'ensemble. Quels risques sont supportables et comment les appréhendons-nous ? Quelle est notre marge de manœuvre ? Une adaptation optimale peut conduire à une réduction substantielle des risques, comme le montre le Groupe de travail II au rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGII). Les possibilités d'adaptation sont toutefois très différentes selon les régions et les systèmes. La Suisse se distingue par des capacités d'adaptation élevées (cf. chap. 2.18 Stratégies et mesures de la Confédération en matière d'adaptation aux changements climatiques, p. 144), tandis que les pays connaissant une pauvreté importante ou une direction politique peu favorable ou inexisteante ont moins de possibilités dans ce domaine.

L'adaptation est parfois incluse dans certains processus de planification, alors que la réalisation de mesures reste plutôt limitée. Des mesures techniques sont par contre souvent mises en œuvre en étant intégrées, la plupart du temps, dans des programmes déjà existants, comme les programmes de gestion des risques de catastrophes ou de gestion de l'eau. Une première étape sur la voie de l'adaptation aux changements climatiques futurs est la réduction de la vulnérabilité et de l'exposition aux variations climatiques actuelles (résilience accrue). Les stratégies qui présentent simultanément des avantages connexes dans d'autres secteurs, par exemple, dans la promotion de la santé humaine ou de la qualité de l'environnement, s'avèrent particulièrement efficaces (IPCC 2014/WGII/SPM).

Le nouveau rapport d'évaluation du GIEC montre en outre que les risques d'un accroissement de la température mondiale de deux degrés sont significativement moins élevés que ceux d'un réchauffement de quatre degrés.

Chaque degré supplémentaire de réchauffement entraîne à la baisse la marge de manœuvre économique et technique. Tous les systèmes ne peuvent pas s'adapter et des limites sont atteintes. Il y a donc des possibilités de réagir aux changements climatiques, mais elles ne fonctionnent que dans un cadre donné, et elles doivent s'accompagner d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre. La réduction des émissions est et reste la réaction la plus efficace aux changements climatiques (cf. Partie 3: Atténuation, p. 149).

## Bibliographie

- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011**. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- OFEV (2012) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d'action**. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2014) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Plan d'action 2014–2019**. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2015) **Politique forestière 2020**. [www.bafu.admin.ch/forets](http://www.bafu.admin.ch/forets)
- PNR 61 (2015) **Gestion durable de l'eau en Suisse – Le PNR 61 montre les voies à suivre pour l'avenir**. Synthèse globale du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau», Berne. [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)

## 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC

**Pour la première fois, le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC considère les conséquences des changements climatiques en adoptant résolument le point de vue du risque pour l'être humain et pour l'environnement. Ce nouveau concept envisage le risque non plus, unilatéralement, comme la conséquence des menaces externes résultant des changements climatiques, mais comme l'interaction entre le climat, ses incidences et les processus socioéconomiques de la société.**

*Christian Huggel (Université de Zurich)*

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC conçoit le risque des changements climatiques comme une partie intégrante de la lutte contre les changements induits par la société. Les risques naissent de l'interaction entre les trois composantes des aléas climatiques avec l'*exposition* et la *vulnérabilité* de l'homme et de l'environnement vis-à-vis de ces aléas (fig. 2.3). L'homme peut avoir une influence active sur les effets possibles en réduisant le risque par des adaptations appropriées. En réduisant les émissions, il peut aussi limiter le changement climatique d'origine anthropique.

Cette approche intégrale reflète le déplacement de paradigme que l'on observe également dans les publications scientifiques. La distinction entre ces différents aspects – aléa externe, exposition et vulnérabilité de l'homme et de l'environnement – constitue une extension importante par rapport aux précédents rapports d'évaluation du GIEC: cette manière nouvelle de structurer les informations simplifie la gestion du risque et le développement des instruments de politique.

### Eléments centraux du concept de risque

#### Risque

Le risque désigne les conséquences éventuelles et incertaines d'un événement sur quelque chose ayant une valeur. Le risque est le résultat d'une interaction entre aléa, exposition et vulnérabilité. Le rapport d'évaluation du GIEC se penche sur le risque lié aux changements climatiques.

#### Aléas

C'est l'éventualité d'un phénomène ou d'une tendance physique, naturelle ou climatique, ou de leur incidence physique susceptible d'entraîner des pertes en vies humaines, des blessures ou autres effets sur la santé. Outre l'homme, les biens et les systèmes naturels (p.ex. les écosystèmes terrestres) peuvent également être exposés aux

aléas. Les aléas ont deux composantes: la probabilité d'occurrence et l'intensité du phénomène (p.ex. en cas d'inondations ou de tempête).

#### Exposition

C'est la présence de personnes, de moyens de subsistance, d'espèces ou d'écosystèmes, de ressources et services environnementaux, mais aussi d'infrastructures ou de biens économiques, sociaux ou culturels dans des lieux susceptibles de subir des dommages.

#### Vulnérabilité

C'est la propension ou la prédisposition à subir des dommages. La vulnérabilité englobe aussi la sensibilité aux dommages, aux pertes et à la souffrance, et l'incapacité d'y faire face ou de s'y adapter. La vulnérabilité physique est révélatrice de la capacité de résistance (structurelle) d'un objet face aux effets d'un processus dangereux (p.ex. une avalanche), tandis que la vulnérabilité sociale inclut des aspects tels que la prospérité, l'âge, le niveau de formation, le statut social ou le sexe.

#### Incidences

Ce sont les effets, sur les systèmes naturels et humains, des phénomènes météorologiques et climatiques extrêmes ou de changements progressifs (p.ex. élévation du niveau des mers ou raréfaction de l'eau dans les régions sèches).

### Le concept de risque dans la pratique

Pour définir les mesures nécessaires pour l'homme et l'environnement sur la base d'un risque existant, il convient de procéder d'abord à l'analyse et à l'évaluation de ce risque. Ce n'est qu'au terme de cette étape que les mesures nécessaires peuvent être planifiées. Deux exemples permettent d'illustrer la gestion des risques:

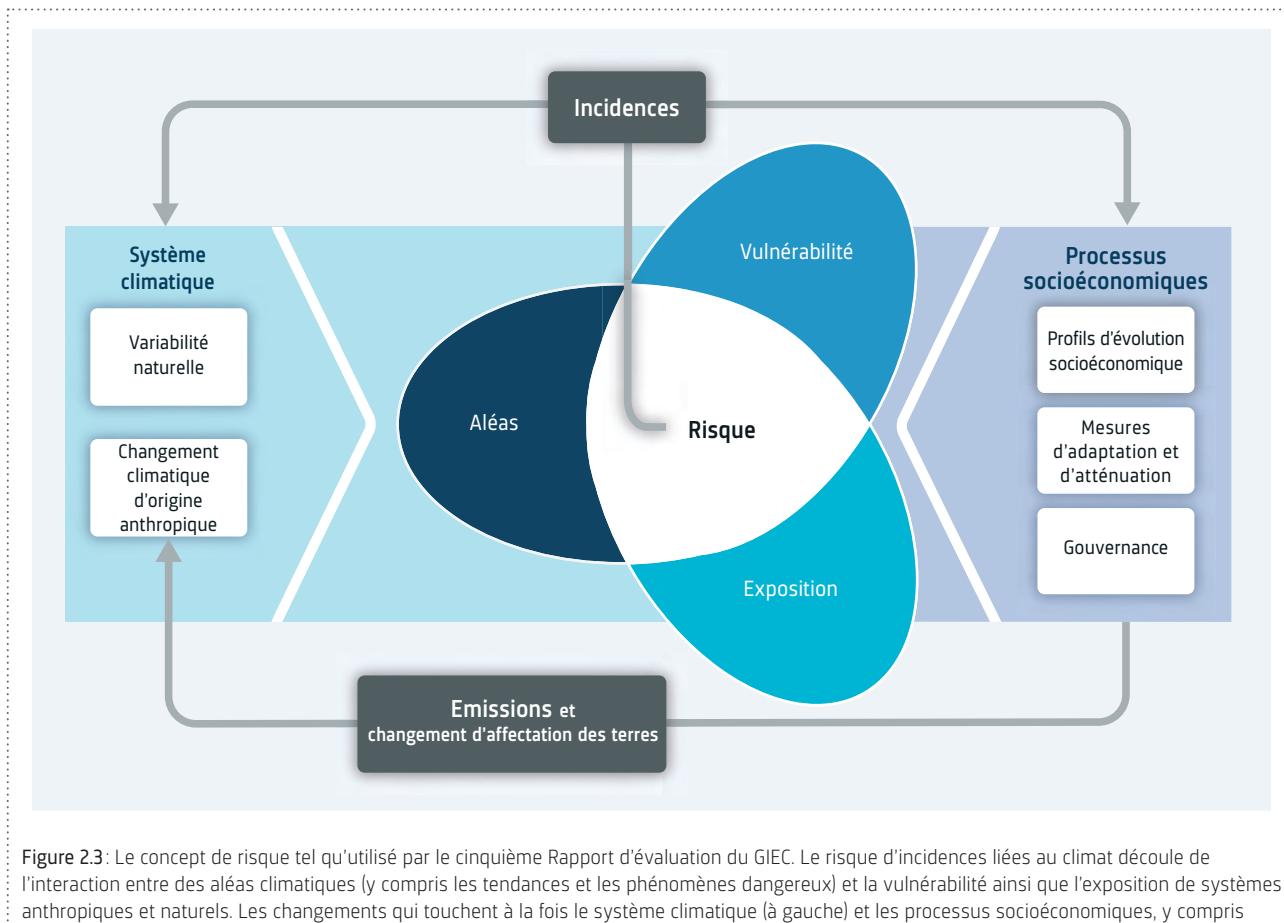


Figure 2.3: Le concept de risque tel qu'utilisé par le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC. Le risque d'incidences liées au climat découle de l'interaction entre des aléas climatiques (y compris les tendances et les phénomènes dangereux) et la vulnérabilité ainsi que l'exposition de systèmes anthropiques et naturels. Les changements qui touchent à la fois le système climatique (à gauche) et les processus socioéconomiques, y compris l'adaptation et l'atténuation (à droite), sont les principales causes des aléas, de l'exposition et de la vulnérabilité. (Source: IPCC 2014/WGII/SPM)

## Risque pour les voies de communication

Le risque pour la société de situations mettant la vie en danger créées par un glissement de terrain sur une voie de circulation augmente avec les épisodes de précipitations extrêmes de plus en plus nombreux (aléas) et avec l'accroissement du trafic et donc de la densité de personnes présentes (exposition). Si l'accessibilité du site exposé est difficile, ce qui rend les opérations de sauvetage compliquées, cela accentue la vulnérabilité et accroît encore le risque général. Des mesures d'infrastructures (galerie, tunnel) peuvent limiter fortement la vulnérabilité, pour autant que les conditions financières, politiques et sociétales adéquates soient réunies pour un tel chantier.

## Risque pour les zones habitées

En Suisse, différentes zones d'habitation se trouvent en territoire inondable et sont donc exposées, comme le montre l'exemple concret du quartier de la Matte dans la ville de Berne. Ce quartier est menacé d'inondation dès

que le débit de l'Aar dépasse les 440 mètres cubes d'eau par seconde (AWA Fakten 2010). Compte tenu de sa situation dans un passage étroit du cours de l'Aar, l'exposition de ce quartier historique ne peut être modifiée. Différentes mesures ont cependant permis de réduire l'aléa: tout d'abord le creusement d'une galerie d'évacuation des crues à Thoune, d'une capacité d'écoulement de 100 mètres cubes d'eau par seconde, grâce à laquelle la quantité d'eau à la sortie du lac de Thoune peut être doublée lorsque le lac est peu rempli, et peut être relevée de 300 à 400 mètres cubes d'eau par seconde même lorsque le lac est à un niveau intermédiaire. En cas d'aléa de fortes précipitations dans le bassin versant de l'Aar en amont de Thoune, le lac peut être abaissé d'environ 20 centimètres par jour grâce à cette galerie, quel que soit le niveau du lac. Cela correspond à dix millions de mètres cubes d'eau, ce qui crée dans le lac de Thoune un volume de rétention supplémentaire des eaux de précipitations du bassin versant de l'Aar. Une autre mesure de réduction de l'aléa est l'endiguement temporaire du cours d'eau dans le quartier de la Matte. Des discussions ont lieu actuellement au sujet d'une renaturation de l'Aar entre Thoune et Berne, ce qui

créerait de nouvelles zones de rétention et de territoires inondables. Malgré toutes les mesures prises, le risque d'inondation reste élevé dans le quartier de la Matte: en 2005, on a observé parfois des débits de plus de 1200 mètres cubes d'eau par seconde dans le lac de Thoune, et de plus grandes quantités encore pourraient s'y déverser dans le futur en raison des changements climatiques. Un système d'alerte inondations a déjà été mis en place et inclut l'envoi de messages sur les téléphones portables; ce système d'alarme réduit la vulnérabilité sociale (de la population) et la vulnérabilité physique (des biens).

## Bibliographie

AWA Fakten (2010) **Hochwasserschutz am Thunersee**. Direction des travaux publics, des transports et de l'énergie du canton de Berne, Berne, Septembre 2010.

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 19 «Emergent risks and key vulnerabilities». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

## 2.3 Neige, glaciers et pergélisol

**Le changement climatique a une influence notable sur la cryosphère. Ses effets dans le monde se manifestent de façon prononcée sur les deux inlandsis (Groenland/Antarctique), sur la banquise et la glace de lac et de rivière, ainsi que sur la neige, les glaciers et le pergélisol – des composantes très répandues en Suisse aussi. Tous ces milieux ont en commun de réagir aux changements de la température et/ou des précipitations. En Suisse, la transformation de la cryosphère a un impact sur différents domaines de l'environnement, de l'économie et de la société. Le tourisme d'hiver et de ski est fortement touché, de même que la force hydraulique et que la sécurité de zones habitées, d'infrastructures et de voies de transport dans les régions alpines. Des mesures d'adaptation, impliquant des coûts importants, deviennent de plus en plus nécessaires.**

*Christian Huggel (Université de Zurich), Christoph Marty (SLF),  
Jeannette Nötzli (Université de Zurich, \*aujourd'hui au SLF), Frank Paul (Université de Zurich)*

### La situation sur le plan national

#### Impacts sur le tourisme d'hiver et de ski

Un net recul de la durée de l'enneigement est observé depuis quelques décennies en Suisse aux basses altitudes – ce n'est en revanche pas le cas au-dessus de 2000 mètres. A l'avenir, la progression du réchauffement aura pour effet de raccourcir la saison de la neige, de plusieurs semaines suivant l'altitude, et d'élever la limite de la neige de plusieurs centaines de mètres. La hausse attendue des températures et l'augmentation concomitante de la pluie au détriment des chutes de neige (Serquet et al. 2011) auront des impacts substantiels sur le tourisme d'hiver et de ski (cf. chap. 2.11 Tourisme, p. 117). Dans le canton des Grisons, par exemple, le nombre de domaines skiables offrant de bonnes conditions de neige diminuera si l'on ne prend pas des mesures supplémentaires d'enneigement artificiel. Une région est dite offrir de « bonnes conditions de neige » si elle garantit, au moins sept années sur dix, un minimum de 30 centimètres de neige pendant plus de 100 jours par an. Dans un scénario sans mesures explicites de protection du climat (scénario de référence SRES-A2) (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38) et sans enneigement artificiel, le nombre de domaines skiables offrant de « bonnes conditions de neige » diminue d'environ 20 pour cent jusqu'en 2035 et de plus de la moitié d'ici 2085. En recourant à la neige artificielle, le nombre de tels domaines baisse quand même (mais moins) de quelque 25 pour cent jusqu'en 2085. Pour continuer d'assurer de telles « bonnes conditions », il faudrait – mais est-ce seulement possible – tripler l'enneigement artificiel d'ici la fin du siècle (Abegg et al. 2013; CH2014-Impacts 2014). D'autre part, si l'ambiance hivernale fait de plus en plus défaut en plaine, la demande en matière de tourisme classique d'hiver risque de diminuer.

#### Impacts sur la disponibilité en eau et sur les centrales hydrauliques

La forte fonte des glaciers et les modifications de la couverture neigeuse ont des répercussions sur la disponibilité en eau ainsi que sur le secteur énergétique et ses centrales hydrauliques. Même si l'augmentation de la température mondiale peut être limitée à deux degrés (par rapport au niveau préindustriel), les modélisations prévoient que les glaciers perdront encore environ 50 pour cent de leur masse jusqu'en 2050 par rapport à 2000, et à peu près 75 pour cent d'ici 2100 (Salzmann et al. 2012).

Dans la foulée de l'évolution future de la couverture neigeuse, la quantité d'eau stockée sous forme de neige pourrait diminuer de jusqu'à deux tiers, ce qui conduirait à une baisse des écoulements, avant tout au printemps et en été (Schmucki et al. 2015). C'est en haute montagne que ces projections sont le moins fiables : en effet, l'évolution des précipitations en hiver étant peu claire à cette altitude, il n'est pas exclu que les effets du réchauffement y soient compensés en partie – tout dépend de la proportion des précipitations tombant sous forme de neige.

Les données sur l'évolution future des écoulements issus de zones englacées comportent également des incertitudes. Vont-ils augmenter pendant les deux à trois décennies à venir ? Cela dépendra de différents facteurs, notamment de l'ampleur des glaciers des bassins versants. Des glaciers étendus et épais peuvent produire une quantité d'eau de fonte qui augmente fortement en raison de leur épaisseur et malgré la réduction de leur extension ; dans ce cas, les écoulements seront en hausse pendant quelques décennies encore. Cependant, on peut affirmer avec certitude que les écoulements influencés par la fonte des glaciers diminueront en été pendant la seconde moi-

**Figure 2.4:** A la suite du recul des glaciers, de nombreux nouveaux lacs sont nés dans les Alpes, tels que celui du glacier de Trift (photo de bas) – et d'autres se formeront encore. Les risques qu'ils présentent, leur utilisation et leur mise en valeur économique soulèvent de nouvelles questions pour l'exploitation de la force hydraulique et pour le tourisme. Elles ont été étudiées entre autres par le Programme national de recherche 61 (PNR 61). Les mouvements du terrain qui font suite au réchauffement du pergélisol risquent d'endommager des infrastructures de haute montagne (par exemple des paravalanches ou des stations de transport par câble). Des fondations flottantes sont réalisées comme mesure d'adaptation. La photo de droite montre un exemple d'un tel aménagement au-dessus de Randa, dans la vallée de Zermatt. (Sources: Jürg Alean, SwissEduc.ch [photo de bas]; Marcia Phillips [photo de haut])



tié du siècle et que les pointes de débits se décaleront du milieu au début de l'été (Huss 2011).

Quelques études types ont été réalisées au sujet de l'influence du changement climatique et de la fonte des glaciers sur les bassins d'accumulation. Elles prévoient une baisse considérable des écoulements estivaux dans les bassins versants fortement englacés déjà à partir du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle (Finger et al. 2012); cependant, elles ne se basent que sur la diminution de l'extension des glaciers. Une baisse des écoulements estivaux nécessitera éventuellement une adaptation de l'exploitation des bassins d'accumulation et des centrales hydrauliques. De nouveaux lacs glaciaires, qui se forment dans le lit de glaciers en retrait, pourraient être intégrés à des systèmes existants de centrales – si cela est judicieux du point de vue économique, accepté par la société et sans inconvénient écologique (NELAK 2013; ACQWA 2013). Ces dernières années en effet, de nombreux lacs glaciaires se sont formés ou ont augmenté de taille (par exemple au glacier du Rhône et à celui de Trift). Ils font déjà l'objet d'études et de projets concrets de développement de la force hydraulique, c'est le cas, par exemple, pour le glacier de Trift, dans l'Oberland bernois (fig. 2.4).

## Impacts sur la stabilité des pentes et sur le charriage

De même que la fonte des glaciers, le dégel du pergélisol a de sérieux impacts dans les régions alpines de la Suisse, en l'occurrence sur la stabilité des pentes et sur la charge sédimentaire. A la différence des glaciers, les régions alpines de pergélisol ne donnent lieu que depuis relativement peu de temps à des séries systématiques de mesures. Des relevés des températures ont commencé vers la fin des années 1980 dans des glaciers rocheux (corps sédimentaires gelés en mouvement très lent), voire seulement après le tournant du siècle dans des parois rocheuses escarpées. Les données sur des tendances à long terme doivent donc être interprétées avec prudence. En Suisse, la plupart des formations de pergélisol ont des températures situées entre moins trois et zéro degrés Celsius, une valeur proche du point de fusion. De ce fait, le réchauffement de ces formations exige beaucoup plus d'énergie que lorsqu'elles sont plus froides, parce que la transformation de phase (de l'état solide à liquide) consomme en plus de l'énergie de fusion. Dans ces conditions, les tendances du réchauffement du pergélisol se manifestent moins clairement qu'à plus basses températures. Toutefois, on observe en différents endroits que la température augmente dans le sous-sol et que la couche affectée par le dégel annuel devient de plus en plus épaisse (PERMOS 2016). En plus des changements des températures du pergélisol, les vitesses avec lesquelles des glaciers rocheux se déplacent

en aval augmentent elles aussi souvent de façon substantielle et la proportion d'eau contenue sous forme liquide dans le sous-sol croît. Ce sont-là également deux indices d'un réchauffement ou d'une dégradation. Pendant les années 2010, les températures observées dans le pergélisol ont été constamment très chaudes comparées à celles relevées il y a une quinzaine d'années, lorsque la plupart de ces mesures ont démarré (PERMOS 2016). Les gros éboulements<sup>1</sup> issus de zones de pergélisol semblent avoir été plus fréquents pendant les 20 années passées qu'au cours des 150 dernières années (Huggel et al. 2012).

Selon la compréhension actuelle des processus et les modèles informatiques, il est prévisible qu'un réchauffement continu conduira à un épaisissement de la couche affectée par le dégel annuel et, de façon générale, à une hausse des températures dans le sous-sol. Dans ces conditions, le pergélisol continuera de se réchauffer et finira par se dégeler aussi bien dans des éboulis et glaciers rocheux que dans des fissures de rochers remplies de glace. Il est difficile de détailler les prévisions de ces effets à l'échelon local, vu qu'à part l'évaluation de l'évolution future, la détermination de la répartition géographique exacte des formations de pergélisol comporte de grandes incertitudes. Mais on peut dire, de façon générale, que le dégel des zones de pergélisol fera naître de nouveaux dangers dans des régions qui n'étaient pas concernées jusqu'ici. Des chutes de pierres et des éboulements, par exemple, pourraient se produire plus souvent et être de plus grande ampleur, ou l'augmentation des quantités de matériaux meubles pourrait accroître le risque de laves torrentielles lors de fortes précipitations. Ces dernières années déjà, de nouvelles ou plus fortes chutes de pierres ont été observées en différents endroits des Alpes. Les éboulements peuvent toucher directement des zones habitées ou des infrastructures. Mais s'ils se produisent au-dessus de lacs, existants ou nouveaux, ils peuvent déclencher une crue brutale; l'étendue de la zone de danger augmente alors considérablement. Des mouvements et des tassements dans le sous-sol qui se réchauffe ou se dégèle peuvent influencer la durée de vie ou la stabilité d'infrastructures construites sur le pergélisol. Depuis quelques années, des installations de ski et de transport par câble ou des paravalanches font déjà l'objet de mesures destinées à atténuer les effets du réchauffement (fig. 2.4).

Les changements attendus affectant les glaciers et le pergélisol ont des incidences également sur le charriage. Des formations sédimentaires sont dégagées par la fonte des glaciers, et après le dégel du pergélisol, des corps détritiques, gelés jusqu'alors, sont davantage exposés à l'érosion. Des matériaux détritiques produits en plus grande abondance par les chutes de pierre peuvent accroître le

<sup>1</sup> Volume d'au moins un million de kilomètres cubes

volume de charriage dans des lits de cours d'eau et déclencher ou renforcer des laves torrentielles. Une étude cantonale bernoise prévoit de grands changements du régime de charriage pendant les prochaines décennies, et ceci dans presque tous les bassins versants de l'Oberland bernois (AG NAGEF 2015). A Gutannen par exemple, le dégel du pergélisol, se combinant avec une forte augmentation des chutes de pierres et des laves torrentielles, a eu de graves impacts, ces dernières années, sur d'importantes infrastructures et sur le régime de charriage de l'Aar (cf. chap. Défis pour la recherche, la pratique et la société en lien avec les risques naturels causés par le climat – étude de cas à Haslital (canton de Berne), p. 70). En outre, les changements du volume de charriage ont une grande importance pour les aménagements hydroélectriques.

## Défis pour la Suisse

Les composantes de la cryosphère ont déjà réagi fortement – et dans le cas des glaciers aussi de façon bien visible – à l'évolution du climat. Les changements qui en résultent en haute montagne sont notables (cf. chap. 2.5 Dynamique des paysages et habitats polaires et alpins de haute altitude, p. 88) et il est certain qu'ils se poursuivront et se renforceront encore à l'avenir. La Suisse devra s'arranger avec de nouveaux paysages sans glaciers et avec les conséquences qui en découlent. Il faut s'attendre à de forts changements saisonniers du régime hydrologique (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84), qui auront des impacts sur l'économie énergétique et sur l'agriculture (cf. chap. 3.4 Energie, p. 168, chap. 2.10 L'agriculture, p. 111), notamment en relation avec une augmentation probable de la fréquence des périodes de canicule et de sécheresse. Le déplacement de la limite de la neige et la détérioration des conditions d'enneigement sont de grands défis pour le tourisme (cf. chap. 2.11 Tourisme, p. 117). En outre, le secteur de l'énergie, les transports et les zones habitées seront de plus en plus touchés par des changements du régime sédimentaire et par des éboulements et des laves torrentielles. Il en résultera de nouveaux défis en matière de gestion des dangers et des risques et pour l'exploitation et la sécurité des infrastructures (cf. chap. 2.12 Bâtiments et infrastructures, p. 121).

## Bibliographie

- Abegg B, Steiger R, Walser R (2013) **Aktuelle und zukünftige Schneesicherheit der Bündner Skigebiete**. In: Herausforderung Klimawandel: Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. Amt für Wirtschaft und Tourismus & Bergbahnen Graubünden.
- ACQWA (2013) **Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water**. A large integrating project under EU Framework Programme 7 (FP7), coordinated by the University of Geneva, Switzerland (2008–2013). [www.acqwa.ch](http://www.acqwa.ch)
- AG NAGEF – Groupe de travail des dangers naturels du cantone de Berne (2015) **Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen**. Berne, 36 pp.
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Finger D, Heinrich G, Gobiet A, Bauder A (2012) **Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century**. Water Resources Research 48: W02521.
- Huss M (2011) **Present and future contribution of glaciers to runoff from macroscale drainage basins in Europe**. Water Resources Research 47: W07511.
- Huggel C, Allen S, Deline P, Fischer L, Noetzli J, Ravanel L (2012) **Ice thawing, mountains falling—are alpine rock slope failures increasing?** Geology Today 28: 98–104.
- Jouvet G, Huss M, Funk M, Blatter H (2011) **Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate**. Journal of Glaciology 57: 1033–1045.
- Linsbauer A, Paul F, Machguth H, Haeberli W (2013) **Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps**. Annals of Glaciology 54: 241–253.
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques**. PNR 61. Haeberli W, Büttler M, Huggel C, Müller H, Schleiss A (eds.). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 pp.
- PERMOS (2016) **Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014**. Noetzli J, Lüthi R, Staub B (eds.). Glaciological Report (Permafrost) No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Radíć V, Bliss A, Beedlow AC, Hock R, Miles E, Cogley JG (2013) **Regional and global projections of the 21st century glacier mass changes in response to climate scenarios from GCMs**. Climate Dynamics 42: 37–58.
- Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glaciers' response to the global «2°C air temperature target»**. Environmental Research Letters 7: 044001.
- Serquet G, Marty C, Rebetez M, Duxley JP (2011) **Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation day ratio in Switzerland**. Geophysical Research Letters 38: L07703.
- Schmucki E, Marty C, Fierz C, Lehning M (2015) **Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs**. International Journal of Climatology 35: 3262–3273.

## 2.4 Eau

**Les changements climatiques vont engendrer des transformations marquantes du cycle de l'eau – avec des conséquences majeures comme la pénurie d'eau en été et la remise en cause des bases de la vie en raison des inondations. L'état des connaissances permet de réagir en Suisse aux changements climatiques par une approche intégrative, dans le domaine de l'eau également. En plus de mesures visant à les juguler, il est nécessaire de prendre aussi des mesures d'adaptation aux conséquences des changements climatiques. Etant donné qu'on peut d'ores et déjà évaluer avec une certitude relativement grande les caractéristiques de la situation hydrologique future, une action est déjà possible. Il faut également tenir compte des mutations socioéconomiques qui auront un impact considérable sur la demande future en eau. Il convient donc de mettre en place une gestion de l'eau ainsi que des instruments de planification régionaux prenant en considération tous les aspects.**

Rolf Weingartner (Université de Berne), Ole Rössler (Université de Berne)

«L'eau, c'est la vie.» La disponibilité de l'eau joue un rôle capital dans l'approvisionnement en eau potable, la production agricole et industrielle ainsi que la production d'énergie. Mais un excès d'eau peut aussi compromettre la vie et occasionner des dommages, par exemple, en raison des crues ou des coulées de boue. Toute modification du cycle de l'eau en raison des changements climatiques a donc des conséquences directes pour l'Homme et l'environnement. Cependant, les processus du cycle de l'eau sont complexes et ne sont pas uniquement influencés par les changements climatiques.

Schématiquement, le système Eau est un équilibre entre les ressources en eau disponibles et la consommation (fig. 2.5). Le climat, les conditions socioéconomiques et l'action politique sont des conditions cadres déterminantes à prendre en compte dans la gestion de l'eau. Idéalement, il va falloir adopter à la fois des mesures d'adaptation aux changements survenus et futurs, mais aussi des mesures visant à juguler les changements climatiques et à réduire leur impact.

### Situation mondiale

Selon le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, il est probable qu'au cours des 50 dernières années, le cycle mondial de l'eau a changé en raison d'un réchauffement du climat dû à l'activité humaine (IPCC 2014/SYR/SPM). On a notamment observé une augmentation de la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, un déplacement des modèles de précipitations régionaux ainsi qu'une intensification des fortes précipitations. Parallèlement, les périodes pauvres en précipitations et les vagues de chaleur ont augmenté. Dans les régions de montagnes et aux latitudes hautes, les glaciers fondent et l'importance de la neige dans le cycle de l'eau diminue.

L'évolution des précipitations est déterminante pour la physionomie future du cycle de l'eau. Dans les statistiques annuelles de précipitations, on constate une augmentation dans les latitudes humides élevées et moyennes<sup>1</sup> et une diminution dans les régions sèches des latitudes moyennes ainsi que dans les régions subtropicales sèches. Ces changements vont s'accentuer dans la seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle, ce qui signifie que les contrastes géo-

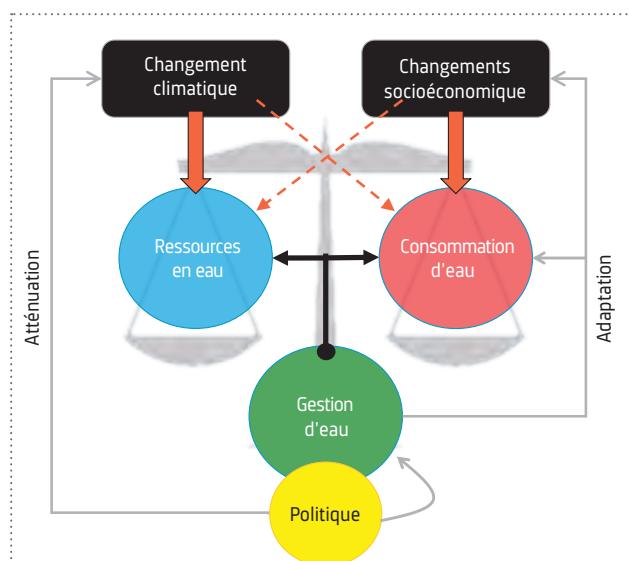


Figure 2.5: Une gestion au niveau régional constitue la clé d'une utilisation optimale de l'eau. L'objectif est de mettre en place une gestion durable de la ressource eau, c'est-à-dire d'adapter la demande aux ressources, ce qui implique l'adoption de mesures d'adaptation d'ordre politique. Mais une politique prospective doit aussi impérativement viser la réduction des gaz à effet de serre.  
(Source: figure élaborée par les auteurs)

<sup>1</sup> Riches en précipitations

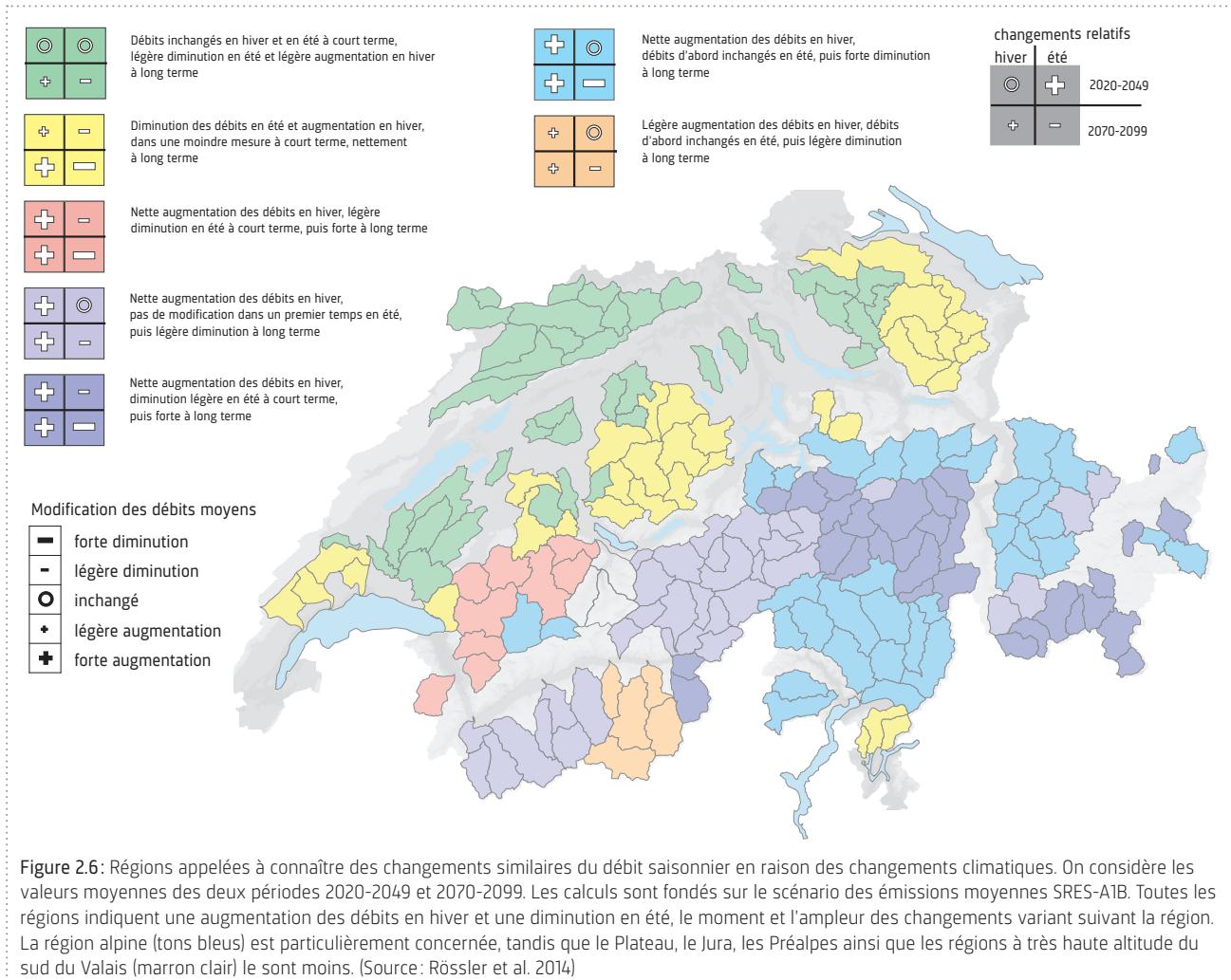


Figure 2.6: Régions appelées à connaître des changements similaires du débit saisonnier en raison des changements climatiques. On considère les valeurs moyennes des deux périodes 2020-2049 et 2070-2099. Les calculs sont fondés sur le scénario des émissions moyennes SRES-A1B. Toutes les régions indiquent une augmentation des débits en hiver et une diminution en été, le moment et l'ampleur des changements variant suivant la région. La région alpine (tons bleus) est particulièrement concernée, tandis que le Plateau, le Jura, les Préalpes ainsi que les régions à très haute altitude du sud du Valais (marron clair) le sont moins. (Source: Rössler et al. 2014)

graphiques et saisonniers entre « sec » et « humide » vont continuer de se renforcer. L'augmentation ou la diminution des quantités de précipitations ont des effets directs sur les débits et la recharge des nappes phréatiques. Les conséquences de ces changements sont multiples. Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC cite notamment les aspects suivants :

- Grave détérioration voire destruction des bases de la vie en raison des crues plus importantes.
- Difficultés dans l'approvisionnement alimentaire dues à une variabilité accrue des précipitations et aux risques naturels accrus.
- Détérioration des conditions de vie et de la situation économique en raison d'un accès plus difficile à une eau potable sûre et d'une moindre disponibilité de l'eau d'irrigation.
- Pertes d'écosystèmes (hydrologiques) avec des conséquences négatives sur la biodiversité et les performances.

Un grand nombre de ces risques concernent les zones urbaines dans lesquelles vit actuellement 50 pour cent de la population mondiale, sachant que ce chiffre passera à environ 65 pour cent au milieu du siècle (Deutsche Stiftung Weltbevölkerung 2016).

D'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle, le volume total des glaciers reculera de 15 à 85 pour cent selon l'importance du réchauffement. En outre, il est certain que, dans l'hémisphère Nord, la couverture neigeuse au printemps va diminuer (IPCC 2014/SYR/SPM; chap. 1.9 Les océans et la cryosphère, p. 60, chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80). Dans ce contexte, il convient de souligner que, dans bien des endroits, les modifications de la couverture neigeuse auront des répercussions plus importantes sur le régime hydrologique que la fonte des glaciers.

## Suisse – contours de l'avenir hydrologique

Dans l'état actuel des connaissances, les précipitations annuelles totales en Suisse ne varieront pas significativement par rapport à leur niveau actuel. En effet, le pays se trouve dans la zone de transition entre l'Europe du Nord où les précipitations augmenteront et l'Europe du Sud où elles diminueront. Il faut cependant s'attendre à des changements, parfois importants, sur le plan des saisons : les projections climatiques indiquent une diminution des précipitations en été, et une légère augmentation de celles-ci en hiver, surtout au sud du pays (Fischer et al. 2014). La diminution en été – ici, toutes les projections climatiques concordent – va engendrer des phases de sécheresse plus longues, entrecoupées de précipitations plus intenses.

S'il subsiste encore des incertitudes importantes à propos des changements saisonniers concernant les précipitations, l'augmentation de la température de l'air est très probable, ce qui a des conséquences notables sur la neige et les glaciers, et donc sur le régime hydrologique. Les considérations suivantes illustrent le phénomène. En Suisse, la part de l'eau de fonte dans le débit annuel, qui est actuellement d'environ 40 pour cent, va diminuer pour atteindre environ 24 pour cent – avec une incidence notable sur le comportement saisonnier du débit (cf. chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46).

### Redistribution saisonnière des débits

Les simulations modélisées concernant les effets des changements des températures et des précipitations sur le débit ont permis d'identifier sept régions de Suisse non contigües où l'incidence sera identique. Dans toutes les régions, on observe une diminution plus ou moins importante des débits en été et une augmentation en hiver. Il existe donc une redistribution saisonnière des débits, pour des quantités restant constantes sur l'ensemble de l'année. Les changements les plus importants s'observeront probablement dans la région alpine et à long terme (après 2050). De façon générale, on peut résumer comme suit la situation dans les sept régions :

- Sur le Plateau et dans le sud du Tessin, les débits suivent les précipitations : dans un avenir proche, les débits moyens resteront pratiquement inchangés, tandis qu'une redistribution saisonnière interviendra à long terme. L'évolution du débit suit donc les projections de changement des précipitations (cf. ci-dessus). La légère augmentation des débits en hiver est également imputable à l'augmentation des températures, qui se traduit par une diminution du stockage des précipitations sous forme de neige.
- Les débits dans les bassins versants alpins couverts de neige à certaines saisons et comportant parfois des gla-

ciers sont surtout fonction de la température, ce qui signifie que la fonte des neiges et des glaciers est prédominante dans l'évolution du débit : l'augmentation de la température de l'air entraîne une augmentation de l'altitude de l'isotherme zéro degré et donc une plus forte proportion de pluie. Ce phénomène se traduit à son tour par une augmentation des débits au cours du semestre d'hiver. En outre, aux altitudes inférieures et moyennes, la fonte des neiges intervient plus tôt. Les débits diminuent donc en mai et en juin. De juillet à septembre, les débits continuent de baisser en raison de la réduction voire de l'absence de fonte des glaciers. Exception : les bassins versants situés à très haute altitude au sud du Valais pour lesquels le changement lié à la température est moins marqué.

Une forte diminution des débits en été a de lourdes conséquences sur l'approvisionnement en eau. De même, elle augmente le risque d'élévation importante de la température de l'eau, car les eaux peu profondes se réchauffent davantage et renforcent encore l'augmentation de la température de l'air prévue. L'élévation de la température et de la limite de chute des neiges qui en découle va accroître dans tous les bassins versants l'influence directe des précipitations liquides, ce qui augmentera la variabilité intra- et interannuelle du débit. Toutes les projections de changements liés à la température de l'air, et en particulier le transfert des débits de l'été vers l'hiver, peuvent être considérées comme très sûres. Ces connaissances permettent d'ores et déjà de planifier et de mettre en œuvre les premières mesures d'adaptation.

### Événements extrêmes

Les prévisions confirmant l'évolution future des crues et basses eaux extrêmes (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52) sont encore incertaines. Cela s'explique d'une part par le fait que la modélisation des événements météorologiques extrêmes dans les modèles climatiques présente encore de grandes faiblesses. D'autre part, l'ampleur d'une crue dépend de différents facteurs, si bien qu'il n'est pas possible de conclure à une augmentation des grandes crues et/ou des pics de crues uniquement sur la base de l'intensification des fortes précipitations liée au climat. Mais à partir des projections d'augmentation des températures, il est possible de déduire que la saison des crues dans l'espace alpin va s'allonger (Köplin et al. 2014) et que le volume des crues va augmenter. En outre, les périodes de basses eaux sur le Plateau vont devenir plus fréquentes et plus intenses (OFEV 2012).

## Les défis pour la Suisse

Nous le disions en introduction, la réduction des émissions des gaz à effet de serre est le moyen le plus efficace de réagir au changement climatique et à ses conséquences – également du point de vue de l'eau (Rössler et al. 2014). Mais des mesures d'adaptation sont aussi nécessaires.

La planification des mesures d'adaptation requiert une analyse globale. Outre le changement climatique, il faut aussi prendre en considération le changement socioéconomique qui a une influence considérable sur la demande future en eau et sur les paysages (Reynard et al. 2013). Les impacts du changement socioéconomique pourraient être nettement plus importants que les conséquences des changements climatiques, en particulier sur le Plateau suisse, dans le Jura et dans les Préalpes (PNR 61 2015). C'est la raison pour laquelle il est impératif de créer des instruments de planification régionaux intégrant tous les aspects de l'eau. Il convient de concevoir la gestion de l'eau de telle sorte que les ressources soient prises en compte et que la répartition de l'eau demandée s'effectue selon des règles claires et justes (fig. 2.5), et qu'il soit possible de réagir avec souplesse aux futures périodes de sécheresse et de crues. Ainsi, la construction de nouveaux réservoirs et l'utilisation accrue des réservoirs existants permettraient de supporter les pénuries estivales tout en atténuant les pics de crues. L'objectif de telles mesures est de recueillir l'eau disponible en grande quantité durant l'hiver ou les phases de crues, pour la rendre disponible pour les différents utilisateurs pendant les périodes de sécheresse estivales.

## Bibliographie

- Deutsche Stiftung Weltbevölkerung (2016) **Steigende Weltbevölkerung und die Hauptursachen**. [www.dsw.org](http://www.dsw.org)
- Fischer A, Keller D, Liniger M, Rajcak J, Schär CH, Appenzeller C (2014) **Projected changes in precipitation intensities and frequency in Switzerland: a multi-model perspective**. International Journal of Climatology 35: 3204–3219.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)**. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R (2012) **Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types**. Hydrology and Earth System Sciences 16: 2267–2283.
- Köplin N, Schädler B, Viviroli D, Weingartner R (2013) **Seasonality and magnitude of floods in Switzerland under future climate change**. Hydrological Processes 28: 2567–2578.
- MétéoSuisse (2013) **Scénarios climatiques Suisse – un aperçu régional**. Edition 243.
- OFEV (2012) **Impacts des changements climatiques sur les eaux et les ressources en eau**. Rapport de synthèse du projet «Changement climatique et hydrologie en Suisse» (CCHydro). OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1217: 76 pp.
- PNR 61 (2015) **Gestion durable de l'eau en Suisse – Le PNR 61 montre les voies à suivre pour l'avenir**. Synthèse globale du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau», Berne. [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- Reynard E, Bonriposi M, Graefe O, Herweg K, Homewood C, Huss M, Kauzlaric M, Liniger H, Rey E, Rist S, Schädler B, Schneider F, Weingartner R (2013) **MontanAqua**. Anticiper le stress hydrique dans les Alpes – Scénarios de gestion de l'eau dans la région de Crans-Montana-Sierre (Valais).
- Rössler O, Addor N, Bernhard L, Figura S, Köplin N, Livingstone DM, Schädler B, Seibert J, Weingartner R (2014) **Hydrological responses to climate change: river runoff and groundwater**. In: CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 57–66.

## 2.5 Dynamique des paysages et habitats polaires et alpins de haute altitude

L'évolution du climat entraîne des changements particulièrement marqués des paysages et habitats des régions froides. Ils sont perceptibles aujourd'hui déjà, mais s'accentueront à l'avenir, et ont des impacts à tous les niveaux, de local à mondial. En tant que pays alpin, la Suisse est également concernée. L'adaptation aux conséquences du changement climatique requiert un débat ouvert, une planification participative, des approches intégratives et des scientifiques dont les travaux portent sur la modification des géo- et écosystèmes.

*Wilfried Haeberli (Université de Zurich)*

### Paysage et changement climatique

Le paysage en tant qu'environnement visible et perçu comme espace de vie de l'homme est un système complexe en réseau où des éléments objectifs se combinent avec des perceptions subjectives de conditions naturelles (paysage naturel) et d'activités humaines (paysage culturel). Les paysages peuvent jouer un rôle essentiel dans l'identité des hommes et des sociétés. Les moteurs des changements paysagers sont la nature (géologie, climat, eau, végétation) et l'homme dont les activités et infrastructures (notamment l'urbanisation, l'agriculture, la production d'énergie, l'économie hydraulique, les transports) modifient la surface du globe à différentes échelles de temps.

Le paysage subit aussi l'influence du changement climatique. Les effets dus au climat se manifestent clairement ou prédominent là où

- le changement climatique est particulièrement fort,
- des éléments du paysage réagissent de façon très sensible aux changements du climat et
- d'autres influences – avant tout des interventions directes de l'homme – restent limitées.

Ces conditions sont remplies dans des régions froides des latitudes élevées et en haute montagne. De ce fait, ces sites sont déjà en train de se transformer rapidement.

### Les changements du paysage sont perçus de diverses manières

La perception, le classement et l'appréciation des changements paysagers sont différents à l'échelon local, régional et mondial et se modifient au cours du temps (Gagné et al. 2014). Par exemple, la « blancheur immaculée des neiges éternnelles » des montagnes a été considérée à l'époque romantique, de même que dans différentes cultures locales, comme symbole d'une relation intacte de l'homme avec son environnement et exploitée avec succès pour promouvoir le tourisme dans les Alpes (Haeberli & Zumbühl

2003). Aujourd'hui, le recul des glaciers témoigne de façon exemplaire du réchauffement planétaire. Du niveau local à régional, des questions pratiques se posent par exemple au sujet de la force hydraulique, des ressources en eau, du tourisme, de la protection du paysage et des dangers naturels. Dans l'approche de questions de ce genre, il importe de tenir compte de différentes appréciations et d'objectifs divergents, pour développer des stratégies d'adaptation bénéficiant d'un haut degré d'acceptation.

### Les changements du paysage ont un impact sur la société et l'économie

Des changements du paysage de régions spécifiques peuvent avoir des répercussions à grande échelle et des effets socioéconomiques de portée considérable. La diminution de la neige et de la glace dans les Alpes, par exemple, influence les cours d'eau en plaine et l'attrait touristique des pays alpins. Avec la progression du changement climatique, il est prévisible que des effets problématiques se manifesteront aussi dans des régions non touchées jusqu'à présent. A long terme, l'élévation du niveau de la mer comme conséquence de la fonte des glaciers modifiera les paysages littoraux dans le monde entier et mettra en danger des zones densément peuplées. Les phénomènes dont l'impact sur le paysage est observé aujourd'hui déjà dans des régions froides sont les signes précurseurs de changements de beaucoup plus grande ampleur et pratiquement irréversibles à l'échelle de temps humaine.

### La dynamique globale

Les changements les plus manifestes attribuables au changement climatique ont lieu dans les vastes espaces froids des hautes latitudes et dans les régions froides de montagne (UNEP 2007, IPCC 2013/WGI/Chap.4; IPCC 2014/WGII/Chap.3 et Chap.18).

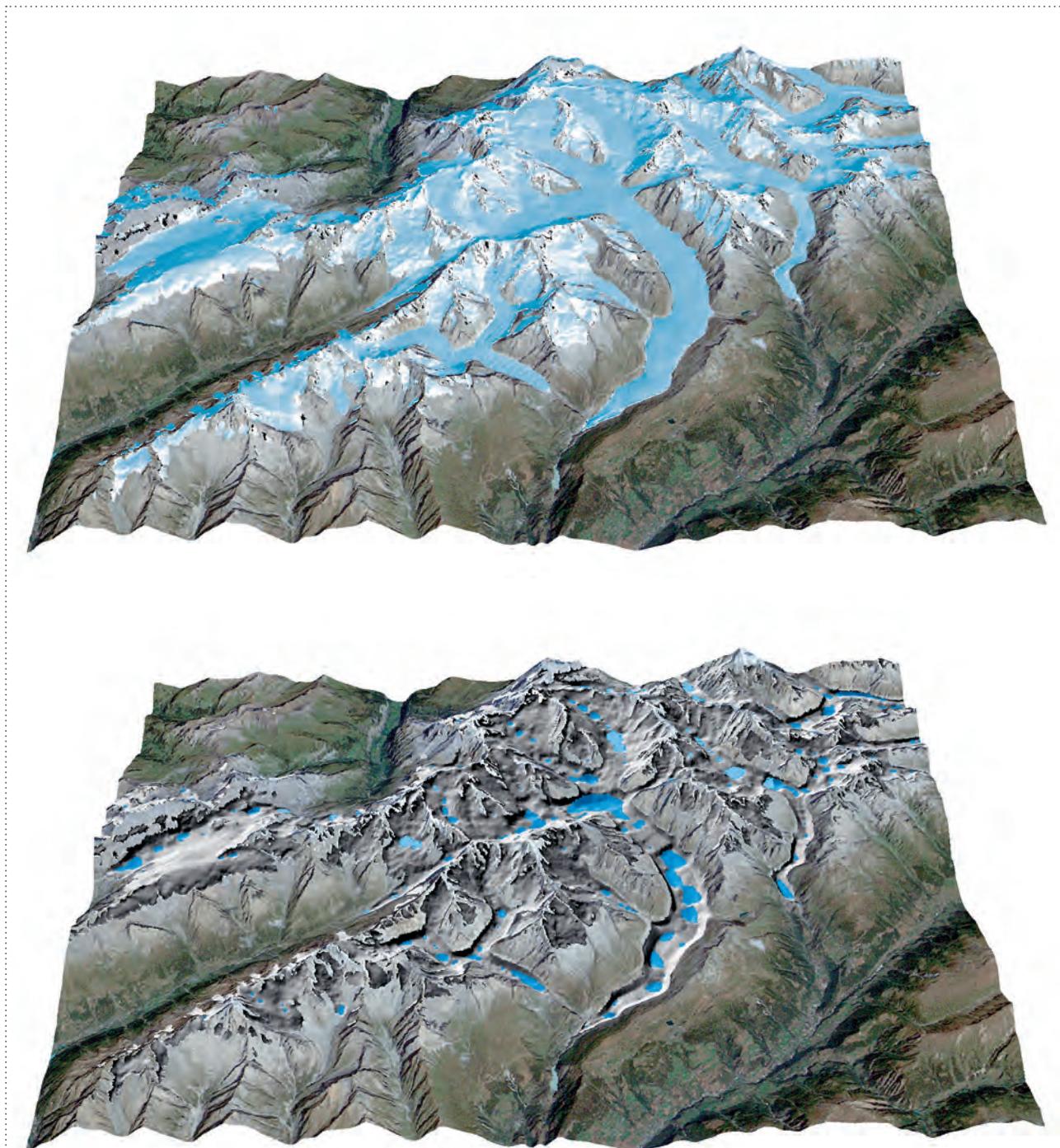


Figure 2.7: La région Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn (patrimoine mondial naturel de l'UNESCO) avec et sans glaciers. Dans l'image sans glaciers, les surcreusements modélisés des lits de glaciers sont marqués en bleu comme lacs potentiels. (Source: Andreas Linsbauer, Institut de Géographie, Université de Zurich)

## Les régions polaires se transforment de façon radicale

Le recul de la banquise arctique entraîne une réduction de la surface du globe recouverte de neige et, de ce fait, une diminution de l'albédo<sup>1</sup> – ce changement du paysage renforce le réchauffement planétaire. Il ouvre en même temps de nouvelles possibilités économiques, notamment pour l'extraction de matières premières et pour les voies de transport. L'absence de glace en été, envisageable d'ici quelques décennies déjà, permettrait de raccourcir les liaisons maritimes entre l'Atlantique et le Pacifique et conduirait alors à l'exploitation, mais aussi à la mise en danger, de paysages, écosystèmes et habitats indigènes encore largement intacts. La menace sur l'habitat de l'ours polaire est déjà devenue un symbole fort de cette évolution.

La fonte accélérée des shelves, de même que le recul rapide de glaciers émissaires des deux inlandsis (Groenland et Antarctique), se déroulent très à l'écart des activités humaines, mais ont des incidences sur la stabilité d'énormes masses de glace, la montée du niveau de la mer et la mise en danger des sites insulaires et littoraux du monde entier. En plus de libérer des gaz à effet de serre supplémentaires, le dégel du pergélisol accroît la perméabilité du sous-sol, ce qui modifie l'hydrographie dans de vastes aires subpolaires et fait surtout disparaître des zones humides de grande étendue et de nombreux lacs. L'effet conjugué de l'élévation du niveau de la mer, de l'amenuisement de la banquise et du dégel du pergélisol renforce l'érosion des côtes aux hautes latitudes, déjà rapide aujourd'hui. Le déplacement à grande échelle de la forêt de conifères boréale, sensible à la température, au détriment des régions de toundra prend beaucoup de temps et est influencé par la transformation du pergélisol sous-jacent.

## Les paysages de haute montagne subissent eux aussi de profonds changements

Les paysages et habitats des régions froides s'écartent toujours plus des états d'équilibre dynamique qui se sont développés pendant la période postglaciaire (holocène) relativement stable du point de vue climatique. Cela vaut également pour les paysages des hautes montagnes du globe, dont les caractéristiques et les fonctions subissent de profonds changements du fait de la diminution de la neige et de la glace. Les Alpes suisses sont un exemple particulièrement bien documenté de cette évolution. (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80).

## La dynamique du paysage dans les montagnes suisses

Les notions de *montagne*, *forêt*, *eau* et *ville* jouent un rôle central dans l'histoire du débat sur le paysage et l'environnement en Suisse (Haeberli 2011). Les changements du climat influencent en premier lieu l'eau, la forêt et les montagnes. Il est prévisible que les bords des cours d'eau et des lacs auront toujours plus à subir les atteintes dues à des modifications saisonnières des conditions d'écoulement, telles que les étiages et les exondations estivales, et que les écosystèmes forestiers seront de plus en plus affectés dans leurs fonctions d'éléments essentiels du paysage et d'habitat (Björnsen Gurung & Stähli 2014). Il faut s'attendre à la substitution des conifères par les feuillus dans les forêts du Plateau (chênes et hêtres au lieu d'épicéas), à la désertification des régions sèches, à des incendies de forêt et à une élévation de la limite de la forêt (cf. chap. 2.9 La forêt, p. 106). Les effets du changement climatique devraient être particulièrement marqués dans les montagnes, lesquelles occupent historiquement déjà une place importante dans l'identité de la Suisse (Walter 1996). Avec l'augmentation des températures, l'étendue et la durée des paysages d'hiver enneigés diminueront. Les étages altitudinaux caractéristiques ne se déplacent pas simplement à plus haute altitude, mais se modifient, parce que des éléments de leurs géo- et écosystèmes, tels que l'eau et la neige, les sols, les plantes ou l'érosion, réagissent différemment et en partie avec un grand retard.

## Les glaciers alpins: une image de marque de la Suisse est en train de disparaître

Il est prévisible que la majeure partie de l'univers des glaciers alpins disparaîtra encore pendant ce siècle, emportant avec lui une image de marque du tourisme suisse, intériorisée par plusieurs générations et exploitée commercialement avec succès. Les glaces présumées éternelles font place à grande vitesse à un nouveau paysage, fait de rochers, éboulis, maigre végétation et nombreux lacs, la plupart de petite taille. Le lent dégel du pergélisol diminue à la longue la stabilité des flancs de montagne, en maints endroits très raides. Il en résulte des éboulements plus fréquents, en partie de grande ampleur. Des déséquilibres prononcés laisseront pour des siècles leur empreinte dans ce paysage.

<sup>1</sup> Le terme d'albédo (du latin *albus*, blanc) désigne le rapport entre la lumière réfléchie et incidente. Les surfaces claires que la neige et la glace forment sur la Terre réfléchissent une grande partie du rayonnement solaire incident. Elles influencent ainsi le bilan radiatif global et le climat mondial.

## Défis et approches de solutions pour la Suisse

Une première étape décisive consiste à lancer, à tous les niveaux, le débat nécessaire de toute urgence sur notre relation aux nouveaux paysages, de montagne avant tout. La Conception « Paysage suisse » (OFEFP 1998) n'aborde pas encore les changements du paysage dus à l'évolution du climat : la notion de « climat » n'y est pas traitée et celle de « paysages alpins en haute altitude » ou de « haute montagne » n'y apparaît qu'en relation avec la défense nationale et l'aviation (bruit dans les régions protégées). Le Programme national de recherche 48 *Paysages et habitats de l'arc alpin* a déjà traité le sujet de façon approfondie (la haute montagne principalement par Haeberli et al. 2007). Mais il faudra très bientôt poser des jalons pour de nombreuses générations à venir. Des questions fondamentales attendent une réponse, par exemple :

- Quels moyens d'existence économiques les régions de montagne peuvent et doivent-elles avoir à l'avenir, leurs paysages de neige et de glace ayant changé ?
- A quoi faut-il prêter attention pour maintenir et développer la production d'énergie et le tourisme ?
- Peut-on laisser à eux-mêmes les nouveaux paysages qui se forment en haute montagne, en dépit de leurs instabilités ?
- Qu'est-ce qu'une marge proglaciaire digne d'être protégée s'il n'y a plus de glacier ?
- Quel sens aura l'inscription au patrimoine mondial naturel de l'UNESCO pour la région Jungfrau-Aletsch-Bietschhorn où le plus grand glacier des Alpes se désagrège et finira par disparaître ?
- De telles questions doivent-elles être traitées au niveau communal et cantonal ou vaut-il mieux les aborder à l'échelon national, voire international –, étant donné la grande extension des hautes Alpes ?

Des concepts fondamentaux et consensuels d'utilisation et de protection des nouveaux paysages peuvent être élaborés sur la base d'un débat ouvert et d'une planification participative. Il faut pour cela des données scientifiques sur les caractéristiques, la dynamique et les principaux déséquilibres des nouveaux paysages – un domaine de recherche inter- et transdisciplinaire voit le jour actuellement à ce sujet. La perspective cloisonnée et sectorielle qui domine encore largement doit être complétée par des approches systémiques. L'exemple des chaînes de processus, où des chutes de pierres et de glace provenant de flancs de montagne très raides et déstabilisés tombent dans de nouveaux lacs et y produisent brusquement de hautes vagues qui peuvent provoquer des crues jusque loin en aval, illustre la nécessité de telles approches (NELAK 2013; cf. chap. 2.6 Dangers naturels provoqués par des changements du système climatique: chaînes de processus et risques complexes, S. 92).

## Bibliographie

- Bhatt US, Walker DA, Walsh JE, Carmack EC, Frey KE, Meier WN, Moore SE, Parmentier F-JW, Post E, Romanovsky VE, Simpson WR (2014) **Implications of arctic sea ice decline for the earth system.** Annual Review of Environment and Resources 39: 57–89.
- Björnsen Gurung A, Stähli M (2014) **Ressources en eau de la Suisse: Ressources disponibles et utilisation – aujourd'hui et demain.** Synthèse thématique 1 dans le cadre du Programme national de recherche PNR 61 «Gestion durable de l'eau», Berne. [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- Gagné K, Rasmussen MB, Orlove B (2014) **Glaciers and society: attributions, perceptions, and valuations.** WIREs Climate Change 5: 793–808.
- Haeberli W, Zumbühl HJ (2003) **Schwankungen der Alpengletscher im Wandel von Klima und Perzeption.** In: Jeanneret F et al. (eds): Welt der Alpen – Gebirge der Welt. Haupt, Bern: 77–92.
- Haeberli W, Keller F, Krüsi B, Egli M, Rothenbühler C, Meilwes J, Gruber S (2007) **GISALP – Raum-zeitliche Information über schnelle Klimaänderungen in hochalpinen Umweltsystemen als strategisches Werkzeug für Analyse, Kommunikation, partizipative Planung und Management im Tourismusbereich Oberengadin.** Rapport PNR 48, Fonds National Suisse, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 213 pp.
- Haeberli W (2011) **Umweltveränderungen und Naturgefahren.** In: Schneider-Sliwa R (ed.): Schweiz – Geographie, Geschichte, Wirtschaft, Politik, WBG Länderkunden, 169–175.
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG I).** Chapter 4 «Observations: Cryosphere». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WG II).** Chapter 3 «Freshwater resources». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WG II).** Chapter 18 «Detection and attribution of observed impacts». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques.** Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61). [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- OFEFP (1998) **Conception «Paysage suisse».** Partie I Conception, Partie II Rapport.
- UNEP (2007) **Global outlook for ice & snow.** UNEP/GRID-Arendal, Norway, 235 pp.
- Walter F (1996) **Bedrohlche und bedrohte Natur – Umweltgeschichte der Schweiz seit 1980.** Chronos Verlag, Zurich, 244 pp.

## 2.6 Dangers naturels provoqués par des changements du système climatique: chaînes de processus et risques complexes

**De nombreux dangers naturels, tels que les inondations, les sécheresses ou les glissements de terrain, dépendent fortement de changements du système climatique, en premier lieu de l'augmentation de la fréquence et de l'intensité d'événements extrêmes. Les changements affectant les dangers naturels sont le résultat de processus complexes et ont des incidences sur l'ampleur à venir des dommages possibles. Les risques diffèrent beaucoup selon la région et dépendent essentiellement de facteurs socioéconomiques et sociaux. Les processus et interactions connexes ne sont compréhensibles que si l'on analyse de façon approfondie l'action conjuguée des systèmes naturels et des systèmes sociaux et socioéconomiques concernés. Or, de nombreuses lacunes et incertitudes subsistent à ce sujet.**

*Martin Hoelzle (Université de Fribourg), Reynald Delaloye (Université de Fribourg), Margreth Keiler (Université de Berne), Nadine Salzmann (Université de Fribourg), Yvonne Schaub (Université de Zurich), Markus Zimmermann (NDR Consulting GmbH et Université de Berne)*

### La situation mondiale

Au niveau mondial, les simulations du climat futur au moyen de modèles climatiques servent de base aux évaluations des conséquences du changement climatique attendu. Il en découle que l'humanité est confrontée aux défis clés suivants:

- l'élévation du niveau de la mer,
- le réchauffement des océans,
- l'intensification du cycle hydrologique et
- les lents changements de l'offre en eau (temps de plus en plus humide ou sec).

L'intensification ou l'accélération du cycle hydrologique (davantage d'eau s'évapore et tombe ensuite sous forme de précipitations), le réchauffement des océans et la montée du niveau de la mer aggravent le risque de tempêtes et d'inondations sur de nombreux littoraux et augmentent le danger de crues dans différentes régions du globe (« aléas », cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77). De nombreuses régions côtières sont densément peuplées et continuent de s'urbaniser. C'est pourquoi de telles zones seront particulièrement sujettes à l'avenir à des risques élevés et donc à des dommages – d'une part en raison de l'accroissement du coût des objets exposés, telles qu'infrastructures publiques et biens privés, d'autre part du fait de l'augmentation des événements extrêmes (« exposition », cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77).

De grands efforts sont nécessaires dans les différents pays – notamment ceux en développement – de même qu'à l'échelon international pour ramener ou maintenir pendant les décennies à venir les risques à un niveau contrôlable et pour éviter autant que possible l'apparition de nouvelles menaces. Un aspect déterminant à cet égard est l'ampleur des moyens dont disposent les sociétés respec-

tives en matière de gestion et prévention des risques ainsi qu'en termes de développement économique et social; un facteur décisif est aussi leur niveau d'exposition, de vulnérabilité et de résilience (capacité de résister, cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77).

Un défi majeur lors de l'évaluation des risques futurs décluant de dangers naturels sont les incertitudes relatives au changement à long terme de la variabilité climatique naturelle en combinaison avec les changements anthropiques. Des études récentes confirment que les événements extrêmes augmentent de façon générale avant tout en matière de fortes précipitations et de sécheresse (Rajczak et al. 2013; Fischer et al. 2014; IPCC 2012/SREX; cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52). On ne sait pas non plus de façon sûre comment l'exposition et la vulnérabilité des zones menacées se développeront, car cela dépend de décisions politiques, de conditions économiques et de transformations sociales. Même s'il existe des mesures de réduction des risques économiquement payantes, un défi réside dans les limites techniques et financières qui font souvent obstacle à leur mise en œuvre et dans les enchaînements complexes de processus. En Thaïlande, par exemple, un tel enchaînement a eu pour effet en 2011 de mettre une partie importante des infrastructures hors d'état de fonctionner à la suite d'inondations de grande étendue, ce qui a eu un très grave impact sur les moyens d'existence.

### La situation nationale

#### Systèmes en transformation

Les changements mondiaux du climat se manifestent localement de façons très différentes, même à l'intérieur de frontières nationales en cas de variabilité spatiale élevée



**Figure 2.8:** Chaînes de processus se rapportant aux dangers naturels dans les Alpes suisses: A gauche: Sur des pentes raides, des processus gravitaires et/ou hydrauliques peuvent transporter des quantités relativement importantes de matériaux meubles de zones de haute altitude (voire glaciaires et périglaciaires) directement dans les vallées, comme ici dans l'exemple d'un chenal profondément érodé dans la vallée de Zermatt, en Valais. Au milieu: Les phénomènes de déclenchement sont complexes, mais souvent régis par le climat. Ici, par exemple, des laves torrentielles ont été provoquées en juin 2013 par une forte fonte de neige sur le front d'un glacier rocheux s'écoulant à vitesse accélérée en raison du changement climatique. A droite: Dans les zones de transport et/ou de dépôt se trouvent souvent des infrastructures tels que routes, installations ferroviaires, ponts ou maisons, dont l'exposition à des dangers naturels apparus en partie récemment doit être soigneusement examinée.

(Source: Reynald Delaloye, 2009-2013, vallée de Zermatt – VS)

de la topographie, de l'utilisation du sol etc. Des données d'observation à long terme relatives à l'atmosphère et aux systèmes terrestres sont nécessaires pour évaluer le développement du climat local. Elles sont récoltées aujourd'hui au niveau mondial sous le nom de « Essential Climate Variables » (ECV) dans le cadre du Global Climate Observing Systems (GCOS) (2010). Elles permettent

- de mieux comprendre, dans le système Terre, des processus et chaînes de processus influencés par le climat,<sup>1</sup>
- de valider et calibrer des modèles climatiques, terrestres et autres,
- de mieux saisir les variabilités naturelles du passé et
- de mieux évaluer les effets du changement climatique à l'échelon régional.

Il existe aujourd'hui des premières approches pour appréhender globalement des chaînes de processus qui influencent le climat. Elles comportent néanmoins encore de grandes incertitudes en rapport avec de nombreuses rétroactions. La plupart du temps, la modélisation de ces chaînes de processus est fortement hiérarchisée. Elle part de modèles climatiques globaux, qui alimentent ensuite

des modèles locaux sans retour d'information de ces derniers.

#### **Les régions à topographie marquée sont particulièrement touchées**

Les premières expériences avec de tels modèles de processus montrent que la Suisse doit se préparer à de nouveaux développements et à des changements en matière de dangers naturels, ceci avant tout dans les zones à topographie marquée. Alors que les précipitations annuelles moyennes ne présentent pas de tendances claires dans les scénarios climatiques, il faut compter – surtout au sud – avec davantage de longues périodes sèches en été. En même temps, il est probable que les canicules augmenteront en été et que les températures augmenteront aussi en hiver (CH2011) (cf. chap. 1.6 La température, p. 40, chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46).

Une telle évolution modifie fortement les paysages de haute montagne, par exemple en agissant sur la fonte des glaciers et donc aussi sur la disponibilité en eau (Salzmann et al. 2012). Le changement climatique a en outre des incidences sur la stabilité des pentes, à court aussi bien qu'à long terme (Huggel et al. 2012). Il s'ensuit qu'il influence fortement des processus gravitaires, tels que les glissements de terrain, les laves torrentielles et

<sup>1</sup> On entend ici par chaîne de processus une succession de processus couplés (par exemple physiques, chimiques, anthropiques) échelonnés dans le temps.

les éboulements, dans la zone de la cryosphère alpine en rapide transformation. Une autre conséquence du recul des glaciers est la formation de nouveaux lacs – un phénomène qui s'intensifiera à l'avenir (Linsbauer et al. 2015; NELAK 2013). Nombre de ces nouveaux lacs se trouvent au-dessous de glaciers suspendus ou au pied de pentes rocheuses très raides et déstabilisées. Ils peuvent être ainsi atteints par des avalanches de glace ou par des éboulements (Schaub 2015). Ces situations potentiellement dangereuses peuvent durer longtemps.

## Exposition et vulnérabilité dans le contexte de l'évolution des dangers naturels

Les dynamiques en matière de dangers naturels ainsi que de développement économique et démographique doivent être prises en compte dans l'évaluation des risques futurs (Keiler et al. 2010). Par exemple, des chaînes de processus déclenchées par des changements en haute montagne peuvent agir jusque dans les vallées (Schaub 2015) et sur le Plateau, comme ce fut le cas lors des crues de 2005 (Keiler et al. 2010). Des infrastructures très chères peuvent alors être endommagées et les conséquences socioéconomiques être très lourdes.

Tous les scénarios d'un développement urbain et infrastructurel durable en Suisse partent d'une occupation et utilisation continues de l'arc alpin (Perlik et al. 2008). Le mitage de l'espace rural et la densification du tissu urbain aggravent l'exposition aux dangers naturels. Il en va de même de la concentration toujours plus grande de valeurs dans certaines régions des Alpes, dans le milieu urbain et dans les grandes vallées fluviales (par exemple du Rhône en Valais ou du Rhin alpin). Et comme l'on s'attend à davantage de sinistres, les risques augmenteront, donc aussi les dommages. Compte tenu de l'évolution de la vulnérabilité, l'exposition aux événements météorologiques extrêmes (canicules, précipitations, tempêtes; cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52) est un défi. Comme l'est aussi une chaîne de processus qui touche à des infrastructures techniques (par exemple au réseau routier et ferroviaire, au système d'approvisionnement en eau) et entraîne alors des dommages indirects considérables du fait d'interruptions de service (OcCC 2007; cf. chap. 2.12 Bâtiments et infrastructures, p. 121). Les régions concernées sont souvent des lieux intensément exploités (par exemple pour le tourisme) et donc très vulnérables, dans lesquels non seulement des infrastructures coûteuses, mais aussi de nombreuses personnes sont exposées. De ce fait, des dommages même secondaires et tertiaires peuvent avoir un coût très élevé, par exemple à la suite d'interruptions d'exploitation ou du trafic, ou en raison d'atteintes à la réputation suite aux commentaires négatifs dans les médias (Lehmann Friedli 2013; cf. chap.

2.11 Tourisme, p. 117). La Suisse est et reste à différents égards très vulnérable vis-à-vis des changements des dangers et des chaînes de processus.

## Défis et approches de solutions pour la Suisse

Les défis pour la Suisse sont multiples; les approches de solutions devraient se fonder sur un double concept, qui promeut d'une part l'atténuation, c'est-à-dire la lutte contre les causes du changement climatique – par exemple par la réduction des gaz à effet de serre (cf. Partie 3: Atténuation, p. 149) – et qui soutient d'autre part des mesures d'adaptation à un climat plus chaud. En matière de dangers naturels notamment, une gestion prévisionnelle des risques et une définition de l'objectif de protection tenant pleinement compte des aspects spatio-temporels sont nécessaires, de même qu'une compréhension de base des processus et interactions impliqués (cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77). Dans un système démocratique comme celui de la Suisse, l'analyse et l'évaluation de risques existants et nouveaux, ainsi que le choix des mesures d'adaptation possibles, sont soumis à un débat politique et social difficile (cf. OFEV 2012): différents groupes d'intérêt ont des réponses divergentes à la question de savoir quelle importance donner à quels risques et quelles mesures sont nécessaires. Des solutions polyvalentes, comme la prise en compte du cas de surcharge dans la planification de la protection contre les crues, peuvent faciliter la prise de décision (cf. OFEV 2016). A part un large soutien, il est important pour le succès des mesures d'adaptation qu'elles soient discutées dans les meilleurs délais: le nombre d'options possibles diminue avec le temps.

## Bibliographie

- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011**. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- Fischer EM, Beyerle U, Knutti R (2013) **Robust spatially aggregated projections of climate extremes**. Nature Climate Change 3: 1033–1038.
- Fischer EM, Keller D, Liniger MA, Rajczak J, Schär C, Appenzeller C (2014) **Projected changes in precipitation intensity and frequency in Switzerland: a multi-model perspective**. International Journal of Climatology 35: 3204–3219.
- GCOS (2010) **Implementation plan for the global observing system for climate in support of the UNFCCC (2010 update)**. TD-No. 1523.
- Huggel C, Clague JJ, Korup O (2012) **Is climate change responsible for changing landslide activity in high mountains?** Earth Surface Processes and Landforms 37: 77–91.
- IPCC (2012) **Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX)**. [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- Keiler M, Knight J, Harrison S (2010) **Climate change and implications for natural hazards in the Eastern European Alps**. Philosophical Transactions of the Royal Society A 368: 2461–2479.
- Lehmann Friedli T (2013) **Ökonomische Relevanz von Klimaanpassungen im Tourismus. Qualitative und quantitative Kosten-Nutzen-Bewertung von Anpassungsmaßnahmen im Schweizer Alpenraum**. Doctoral thesis, Research Institute for Leisure and Tourism (CRED), University of Bern, 339 pp.
- Linsbauer A, Frey H, Haeberli W, Machguth H, Azam MF, Allen S (2015) **Modelling glacier-bed overdeepenings and possible future lakes for the glaciers in the Himalaya-Karakoram region**. Annals of Glaciology 57: 119–130.
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques**. Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61). [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- OcCC (2007) **Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie**. Berne, 168 pp.
- OFEV (2012) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d'action**. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2016) **Gestion des dangers naturels en Suisse**. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 12.4271 déposé par Christophe Darbellay le 14.12.2012.
- Perlik M, Wissen U, Schuler M, Hofschreuder J, Jame A, Keiner M, Cavens D, Schmid WA (2008) **Szenarien für die nachhaltige Siedlungs- und Infrastrukturrentwicklung in der Schweiz (2005–2030)**. Programme national de recherche PNR 54 «Environnement construit», Zurich, 312 pp.
- Rajczak J, Pall P, Schär C (2013) **Projections of extreme precipitation events in regional climate simulations for Europe and the Alpine Region**. Journal of Geophysical Research 118: 3610–3626.
- Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glacier's response to the global +2°C air temperature target**. Environmental Research Letters 7: 044001.
- Schaub Y (2015) **Outburst Floods from High-Mountain Lakes: Risk Analysis of Cascading Processes under Present and Future Conditions**. Doctoral thesis, Department of Geography, University of Zurich, 292 pp.

## 2.7 Ecosystèmes alpins

**En montagne, la forte structuration du territoire, la diversité de l'inclinaison des pentes et l'exposition au soleil créent dans un espace restreint une mosaïque variée de conditions de température qui amortit les changements du climat à grande échelle. Néanmoins, le changement climatique influence aussi les écosystèmes alpins. Par exemple, vu que la limite des arbres se décalera peu à peu à plus haute altitude en fonction du réchauffement, la surface alpine tendra à diminuer en Suisse malgré l'élargissement de la marge proglaciaire. Le changement climatique et l'expansion en altitude de la forêt de montagne conduisent à une insularisation climatique des sites hauts-alpins. Ces changements des surfaces doivent être pris en compte quand il est question de l'utilisation du sol dans les Alpes. L'effectif des moutons d'estivage, qui atteint déjà un record et continue d'augmenter, fait pression sur une surface alpine en diminution, avec pour conséquence une augmentation de l'érosion et des dégâts de piétinement.**

Christian Körner (Université de Bâle), Eva Spehn (Université de Bâle)

### La situation mondiale et nationale

L'habitat alpin au-dessus de la forêt de montagne représente environ un tiers de la superficie de la Suisse et constitue les derniers grands paysages primitifs d'Europe centrale. Des écosystèmes alpins semblables existent ailleurs dans le monde; ils sont situés à des altitudes qui diffèrent en fonction de la latitude, mais ont un climat semblable en termes de températures. Ils permettent donc de faire des comparaisons mondiales (Körner 2003). En Suisse, les précipitations sont en moyenne deux fois plus abondantes dans l'habitat alpin que dans les vallées; il s'ensuit que les régions de haute altitude fournissent une grande partie de l'eau exploitée pour la production d'énergie. Cependant, les pentes sont raides dans l'habitat alpin et leur stabilité dépend de la densité et de la vitalité de leur végétation; le couvert végétal alpin joue donc un rôle important pour la sûreté de zones d'habitation et de voies de transports. La biodiversité y est très grande, un quart environ des espèces de plantes à fleurs que l'on trouve en Suisse ont pour habitat les régions situées au-dessus de la limite alpine des arbres. L'influence de l'homme sur les écosystèmes alpins est certes décelable, mais en général, elle ne les a pas transformés de façon marquante. Un suivi à long terme de l'environnement, tel qu'il a lieu pour la forêt, n'existe pas en Suisse pour l'habitat alpin.

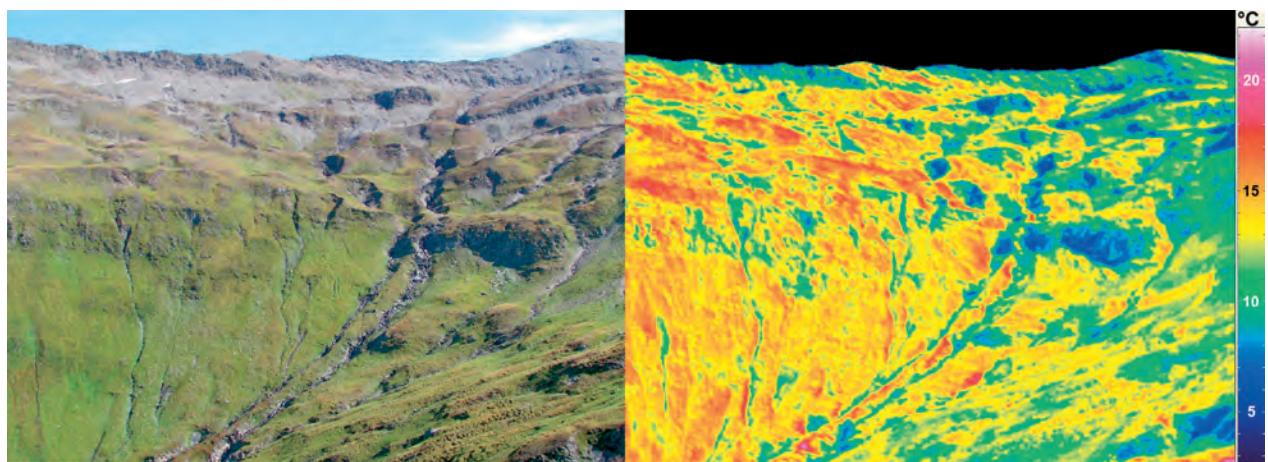
### La vulnérabilité

Sur la base de modèles théoriques, le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC qualifie les systèmes alpins de très vulnérables à l'égard du changement climatique: d'après cela, des espèces rares ou dont la marge de tolérance thermique est étroite devraient régresser, vu que les changements se font trop vite ou qu'un moment viendra où elles ne trouveront plus de lieux où poursuivre leur migration

vers les hauteurs. En réalité, les conditions de vie en terrain alpin se présentent de façon plus nuancée: la forte structuration du territoire, la diversité de l'inclinaison des pentes et l'exposition au soleil au-dessus de la limite de la forêt créent dans un espace restreint une mosaïque variée de conditions de température qui amortit les impacts des changements du climat à grande échelle et rend le système moins vulnérable dans son ensemble. Des gradients climatiques abrupts sur de courtes distances offrent aux organismes alpins des possibilités de migration dans un périmètre réduit (Körner 2003; Scherrer 2010; fig. 2.9). Des modèles à échelle fine rendent plausibles le fait que ces organismes ont une grande capacité de persistance (Randin et al. 2009). En outre, les espèces à croissance clonale (la très grande majorité des espèces alpines) se sont révélées particulièrement robustes à l'égard de changements climatiques (de Witte et al. 2012). Dans la zone de transition vers la forêt de montagne, la surface occupée par la végétation alpine risque de régresser du fait du recul de l'économie d'alpage et en raison de l'élévation, due au climat, de la limite altitudinale de la forêt.

### Changements lents

Des changements de la biodiversité de l'habitat alpin sont attendus à partir d'un réchauffement planétaire moyen de plus de deux degrés Celsius (IPCC 2014/WGII/Chap.4). En montagne, suivant les modèles précités, des espèces biologiques se déplaceront progressivement à plus haute altitude. De tels seuils de température sont à vrai dire artificiels pour des processus continus; à long terme toutefois, un réchauffement de deux degrés Celsius réduirait d'un quart la superficie mondiale de l'étage alpin inférieur et de moitié celle de l'étage supérieur (Körner 2012, tab.5.5). Il est vraisemblable que les proportions seraient à peu près les mêmes en Suisse, étant donné qu'ici aussi



**Figure 2.9:** Dans les sites de haute montagne dépourvus d'arbres, la structure du terrain, l'inclinaison des pentes et l'exposition créent une mosaïque de petits habitats caractérisés par des températures très diverses. C'est pourquoi les organismes alpins sont moins menacés par un réchauffement général que les espèces vivant à plus basse altitude. Les trajets vers des habitats mieux adaptés sont très courts. L'image thermique montre une telle mosaïque de températures à 2500 mètres d'altitude, dans la région du col de la Furka. Pendant une saison, les températures moyennes des différents petits habitats situés sur la pente diffèrent de plus de dix degrés Celsius. Les données reposent sur les mesures effectuées tout au long de l'année au moyen de nombreux capteurs de température répartis sur toute la pente. (Source: adapté d'après Scherrer & Körner 2009)

la limite de la forêt est fonction de la température. Du fait que les espèces pionnières et généralistes se déplaceront plus tôt à plus haute altitude que les espèces spécialisées, lesquelles ont des exigences rigoureuses en matière d'habitat, la composition des espèces se modifiera et tendra à se trivialiser. En Suisse, différents taux de migration de plantes, papillons et oiseaux ont été constatés le long de gradients d'altitude (Roth et al. 2014). Les oiseaux suivent rapidement le changement climatique récent; les plantes réagissent beaucoup plus lentement, de même que les papillons qui en dépendent – probablement en raison des stades des chenilles. Au cours des cent dernières années, le nombre d'espèces végétales a nettement augmenté sur les plus hauts sommets des Alpes centrales (Wipf et al. 2013) du fait de l'immigration d'espèces provenant de zones de plus basse altitude – des espèces dont les semences se répandent facilement et qui ne sont plus écartées de sites proches des cimes à cause de leur besoin de chaleur. Pendant la décennie passée, des plantes à fleurs provenant de zones alpines d'altitude inférieure sont devenues plus fréquentes en Europe en haut des montagnes (Gottfried et al. 2012), notamment dans les régions boréales tempérées (+3,9 espèces en moyenne). En revanche, le nombre d'espèces a eu tendance à diminuer dans des parties méridionales des Alpes et dans les montagnes méditerranéennes (-1,4 espèces en moyenne). La raison à cela est probablement qu'en Europe méridionale, les récents changements climatiques ont diminué la disponibilité en eau pendant le plein été (Pauli et al. 2012). A noter également que l'étude précitée a constaté des changements particulièrement importants (rapides) à l'étage

alpin inférieur, car c'est là que le réservoir d'espèces à disposition est le plus grand et que ces plantes peuvent se propager le plus vite grâce au climat favorable.

#### Les surfaces alpines tendront à diminuer

Le recul rapide des glaciers crée de nouveaux habitats qui constituent un terrain labile et sujet à l'érosion pendant les nombreuses décennies précédant leur complète colonisation par des plantes. En dépit de l'élargissement des marges proglaciaires, il faut s'attendre en Suisse à une diminution de la surface alpine, parce que la limite des arbres, déterminée par la température, se déplacera sur le long terme à plus haute altitude. Au début, cette extension en altitude de la forêt de montagne n'est pas en phase avec le réchauffement du système climatique et comporte encore de grandes différences temporelles et spatiales. Le démarrage des jeunes plantes et le développement des très jeunes arbres dépendent de la conjonction aléatoire de bonnes années à graines et de conditions climatiques particulièrement favorables pendant les années suivantes; de ce fait, les arbres colonisent la ceinture alpine par avancées intermittentes réparties sur des décennies. La possibilité de mesurer la progression de la forêt en se référant aux populations de jeunes plantes est donc limitée (cf. chap. 2.9 La forêt, p. 106). D'autres facteurs, qui n'ont rien à voir avec l'évolution du climat, tels que le recul de l'utilisation du sol, jouent un rôle important dans ce contexte (Gehrig-Fasel et al. 2007). Suivant cette étude, la majeure partie de l'expansion des surfaces boisées est imputable en montagne à la régénération de la forêt (et à l'embroussaillement).

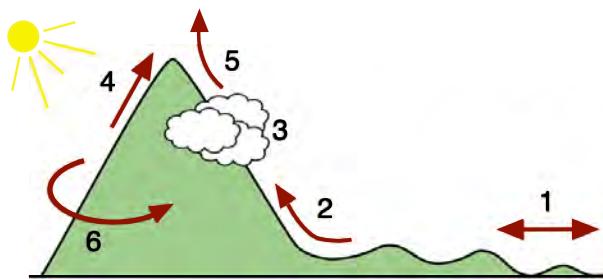


Figure 2.10: Pour se soustraire au changement climatique, les espèces vivant à basse altitude devraient franchir de très grandes distances - pour elles, il n'y a pratiquement aucune issue possible (1). Les montagnes, en revanche, peuvent servir de refuge (2, 4) et l'ont toujours été dans l'histoire de la Terre. Mais elles peuvent aussi être un piège, comme dans le cas de bancs de brouillards passagers dans la forêt tropicale d'altitude ou lorsque des organismes colonisent des montagnes qui ne sont pas encore assez hautes (3, 5). En général toutefois, les montagnes sont une chance (6), parce qu'elles offrent des « chemins de fuite » sur de très courtes distances, comme conséquence de la mosaïque de microclimats. (Source: Körner 2013)

## Événements extrêmes

Dans l'état actuel du savoir, la sécheresse et la chaleur extrêmes ne représentent pas un risque existentiel pour les plantes alpines. Cela tient à la longévité de la plupart de ces espèces végétales: les plus importantes d'entre elles atteignent un âge de plusieurs milliers d'années et se multiplient par voie végétative (clonale) (de Witte et al. 2012), ce qui les rend relativement robustes vis-à-vis de variations à court terme des conditions de vie. En outre, la courte durée de l'été en montagne et les précipitations relativement abondantes excluent un desséchement intense. En conséquence, les effets négatifs de tels événements sont en général fortement atténués en montagne; à la limite de la forêt et au-dessus, ils peuvent même devenir positifs, c'est-à-dire stimuler la croissance (Jolly et al. 2009). L'augmentation des crues soudaines, comme conséquence de la fonte des glaciers, menace les habitats situés en aval et ralentit l'établissement d'un couvert végétal continu dans la marge proglaciaire.

saillement) dans d'anciens pâturages situés au-dessous de la limite climatique de la forêt.

La durée de l'ensoleillement dans la zone supérieure de l'étage alpin (>2300 mètres) est déterminante pour la vie en montagne. La question de savoir si cette durée change n'a pas encore de réponse claire. Au-dessous de 1750 mètres, un recul de l'ensoleillement est évident (Rebetez 1996; Benniston 1997). Mais à plus haute altitude, une couverture neigeuse plus épaisse peut se former à cause de l'augmentation des précipitations et compenser l'effet du changement climatique sur la durée de l'ensoleillement. Certes, le nombre de jours avec chutes de neige décroît quelle que soit l'altitude. Mais cette diminution est moins marquée aux niveaux supérieurs (Serquet et al. 2011). A haute altitude, la période sans neige ne devient pas forcément plus longue, malgré un climat plus chaud.

### L'azote a une grande influence sur la flore

Il existe de sérieux indices selon lesquels les retombées d'azote atmosphérique (dues aux transports, à l'élevage du bétail et aux engrangements) ont actuellement une plus grande influence sur la flore alpine que le changement climatique (Bobbink 2010). Il en résulte des glissements en termes d'espèces végétales dominantes vers des espèces à croissance rapide, au détriment d'espèces à croissance lente, de petite taille et souvent rares. De tels effets ont été mis en évidence dans toute la Suisse, également aux étages altitudinaux inférieurs, par Roth et al. (2013). Il est exclu, selon les connaissances actuelles, que des concentrations de CO<sub>2</sub> plus élevées entraînent une hausse de la productivité de la végétation alpine (Inauen et al. 2012).

## L'adaptation au changement climatique

La plupart des plantes et animaux alpins ont une grande capacité de faire face à des conditions de vie fluctuantes et l'existence de nombreux très petits habitats leur offre des possibilités de migration dans un périmètre réduit (Scherer & Körner 2009; Körner 2013 ; fig. 2.10). Le changement climatique et l'expansion en altitude de la forêt de montagne conduisent à une insularisation des sites hauts-alpins. Lors du dimensionnement de zones protégées et du choix de leur emplacement, de tels changements doivent être anticipés (corridors, réunion de sites de haute altitude en espaces d'un seul tenant). Il est prévisible que l'estivage en terrain alpin continuera d'augmenter, en particulier pour les moutons. Suivant les conditions météorologiques, il s'ensuit un risque accru d'érosion sur les pentes raides, notamment parce que les moutons recherchent la fraîcheur pendant l'été, qui devient toujours plus chaud, et qu'ils la trouvent dans la zone de haute altitude, dont la surface diminuera sensiblement à cause du changement climatique (cf. plus haut). Une surveillance stricte par des bergers compétents est nécessaire, surtout lorsque de grands troupeaux occupent le pâturage – ce qui est devenu habituel aujourd'hui. En combinaison avec le changement climatique, des utilisations inadéquates du territoire alpin peuvent causer des dommages irréversibles aux sols fragiles, ce qui, à son tour, a des impacts sur le régime hydrologique.

## Défis pour la Suisse

A part les problèmes techniques et touristiques (installations sur le pergélisol en dégel, détérioration des conditions d'ennegriement) consécutifs au réchauffement du système climatique (cf. chap. 2.3 Neige, glaciers et pergélisol, p. 80, chap. 2.11 Tourisme, p. 117), les principaux défis en matière de conservation de la nature dans l'habitat alpin sont la préservation et la création de grands espaces protégés suprarégionaux reliés par des corridors permettant des migrations, surtout d'animaux. Un défi spécifique réside dans le pacage à haute altitude (moutons), qui est, depuis peu, en forte augmentation : en l'absence de surveillance par un berger, et vu la diminution

de la surface haute-alpine et les étés plus chauds, il cause des dommages considérables au sol et à la végétation. Les populations croissantes d'animaux sauvages, celles du bouquetin par exemple, sont également poussées par le réchauffement à se déplacer en été vers des sites de plus haute altitude. Un recul des espèces est plutôt improbable aux altitudes les plus hautes, mais possible dans la zone de la limite de la forêt, en raison de la disparition d'habitats (surfaces de foin sauvage, prairies naturelles absorbées par la progression de la forêt vers les hauteurs). Le maintien de telles surfaces par l'application de mesures ciblées est sans conteste un défi considérable.

## Bibliographie

- Beniston M (1997) **Variation of snow depth and duration in the Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcing.** Climatic Change 36: 281–300.
- Bobbink R, Hicks K, Galloway J, Spranger T, Alkemade R, Ashmore M, Bustamante M, Cinderby S, Davidson E, Dentener F, Emmett B, Erisman JW, Fenn M, Gilliam F, Nordin A, Pardo L, De Vries W (2010) **Global assessment of nitrogen deposition effects on terrestrial plant diversity: a synthesis.** Ecological Applications 20: 30–59.
- de Witte LC, Armbruster GFJ, Gielly L, Taberlet P, Stocklin J (2012) **AFLP markers reveal high clonal diversity and extreme longevity in four key arctic-alpine species.** Molecular Ecology 21: 1081–1097.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE (2007) **Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment?** Journal of Vegetation Science 18: 571–582.
- Gottfried M et al. (2012) **Continent-wide response of mountain vegetation to climate change.** Nature Climate Change 2: 111–115.
- Harsch MA, Hulme PE, McGlone MS, Duncan RP (2009) **Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming.** Ecological Letters 12: 1040–1049.
- Inauen N, Körner C, Hiltbrunner E (2012) **No growth stimulation by CO<sub>2</sub> enrichment in alpine glacier forefield plants.** Global Change Biology 18: 985–999.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps.** Geophysical Research Letters 32: L18409.
- Körner C (2003) **Alpine Plant Life [2nd edition].** Springer, Berlin.
- Körner C (2013) **Alpine ecosystems.** In: Levin SA (ed.) Encyclopedia of biodiversity (2nd edition). Elsevier: 148–157.
- Pauli H et al. (2012) **Recent plant diversity changes on Europe's mountain summits.** Science 336: 353–355.
- Randin CF, Engler R, Normand S, Zappa M, Zimmermann NE, Pearman PB, Vittoz P, Thuiller W, Guisan A (2009) **Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence.** Global Change Biology 15: 1557–1569.
- Rebetez M (1996) **Seasonal relationship between temperature, precipitation and snow cover in a mountainous region.** Theoretical and Applied Climatology 54: 99–106.
- Roth T, Kohli L, Rihm B, Achermann B (2013) **Nitrogen deposition is negatively related to species richness and species composition of vascular plants and bryophytes in Swiss mountain grassland.** Agriculture, Ecosystems and Environment 178: 121–126.
- Roth T, Plattner M, Amrhein V (2014) **Plants, birds and butterflies: short-term responses of species communities to climate warming vary by taxon and with altitude.** PLoS ONE 9: e82490.
- Scherrer D, Körner C (2010) **Infra-red thermometry of alpine landscapes challenges climatic warming projections.** Global Change Biology 16: 2602–2613.
- Scherrer D, Körner C (2011) **Topographically controlled thermal-habitat differentiation buffers alpine plant diversity against climate warming.** Journal of Biogeography 38: 406–416.
- Serquet G, Marty C, Dulex JP, Rebetez M (2011) **Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation-day ratio in Switzerland.** Geophysical Research Letters 38: L07703.
- Wipf S, Stöckli V, Herz K, Rixen C (2013) **The oldest monitoring site of the Alps revisited: accelerated increase in plant species richness on Piz Linard summit since 1835.** Plant Ecology & Diversity 6: 447–455.

## 2.8 La biodiversité et les services écosystémiques

**La biodiversité, c'est la multitude de formes que peut prendre la vie sur la terre. Malgré leurs différences, elles ont un point en commun : elles dépendent les unes des autres. Des changements dans les conditions de vie d'une espèce ont des conséquences sur les conditions d'une autre. L'être humain profite de nombreux services écosystémiques fournis par la biodiversité qui nous offre, depuis toujours, des aliments pour nous nourrir, des fibres pour nous habiller, des matériaux pour construire et des substances pour nous soigner. Les écosystèmes intacts purifient l'air et l'eau, rendent les sols fertiles, nous protègent des crues et des éboulements, compensent les effets des changements climatiques.** A l'échelle de la planète comme à l'échelle de la Suisse, la biodiversité et les services écosystémiques souffrent cependant de l'évolution que connaît notre environnement.

*Markus Fischer (Université de Berne), Eva Spehn (Forum Biodiversité/SCNAT et Université de Berne)*

Les services écosystémiques sont des fonctions de l'écosystème avantageuses pour l'homme qui peut généralement les utiliser directement (fig. 2.11). Ils comprennent notamment :

- des produits alimentaires,
- des substances permettant de fabriquer des médicaments,
- des matériaux de chauffage et de construction,
- la purification naturelle de l'air et de l'eau,
- la régulation naturelle du cycle des substances fertilisantes et du microclimat,
- la dégradation des substances nocives,
- la protection contre les dangers naturels,
- la pollinisation,
- la protection contre les nuisibles et les invasions biologiques et
- la stabilité contre les changements climatiques.

De tels services écosystémiques sont essentiels pour notre santé, notre sécurité et notre prospérité. La majorité d'entre eux sont toutefois considérés comme un bien public dont la valeur n'a pas encore été estimée.

La biodiversité est une condition nécessaire pour les services écosystémiques et impérative pour le bon fonctionnement des écosystèmes (Cardinale et al. 2012). Parallèlement, il est possible de considérer la biodiversité comme étant elle-même un service écosystémique de valeur sociétale (Fisher et al. 2009). Les habitats ont besoin d'une certaine qualité quant à la diversité et la fréquence des espèces afin de garantir de nombreux services écosystémiques (Cardinale et al. 2012). En cas de déséquilibre exacerbé dans la composition des espèces (par exemple suite à des changements dans l'affectation des terres ou à des évolutions climatiques), on peut s'attendre à ce que les services écosystémiques disponibles jusque-là ne le soient plus dans la même qualité ou dans la même quantité.

### Situation internationale et nationale

#### Une pression mondiale élevée pèse sur la biodiversité et les services écosystémiques

A l'échelle internationale, la biodiversité évolue à une vitesse inédite en raison des changements environnementaux dus à l'homme (Mace et al. 2005). La diminution de la biodiversité est une conséquence de l'intervention humaine sur la nature, principalement de l'utilisation des terres ainsi que des pertes et des dégradations que celle-ci implique pour les habitats naturels (Newbold et al. 2015). Une évaluation de l'état de la biodiversité naturelle dans les écosystèmes locaux a montré que plus de la moitié des terres était considérée comme « compromise d'un point de vue biotique », c'est-à-dire qu'on y a constaté une perte de plus de 20 pour cent des espèces (Newbold et al. 2016). La baisse de la biodiversité (tant les pertes absolues en gènes, espèces et communautés que leur disparition locale) est considérée, pour sa part, aussi comme un facteur favorisant les changements environnementaux mondiaux, et ce en raison de son ampleur, de son lien étroit avec les services écosystémiques et de l'utilisation par la société des ressources naturelles en biodiversité (Mace et al. 2005).

Les services écosystémiques existent à l'échelle mondiale et ils sont sollicités, en Europe, jusqu'à la limite du supportable, la demande continuant généralement à augmenter (Schröter et al. 2005). En outre, de nombreux indices montrent que les changements climatiques vont intensifier à leur tour cette (sur)exploitation (MA 2005 ; TEEB 2009) puisque leurs conséquences négatives sur les écosystèmes affectent le potentiel de ces derniers à fournir des services écosystémiques.

De plus amples informations sur l'état mondial de la biodiversité et des services écosystémiques, informations transposables en partie à la Suisse, sont attendues pour

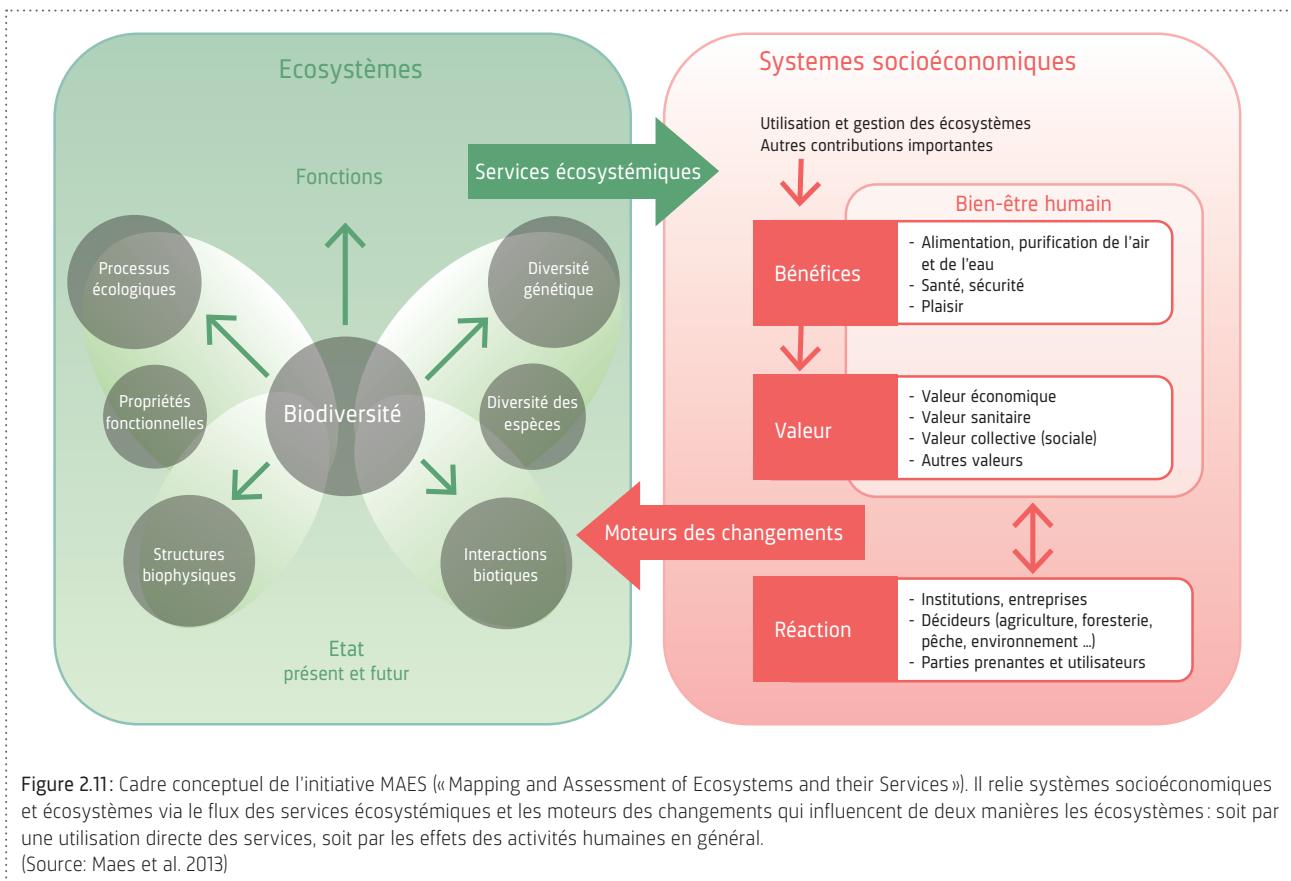


Figure 2.11: Cadre conceptuel de l'initiative MAES (« Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services »). Il relie systèmes socioéconomiques et écosystèmes via le flux des services écosystémiques et les moteurs des changements qui influencent de deux manières les écosystèmes: soit par une utilisation directe des services, soit par les effets des activités humaines en général.  
(Source: Maes et al. 2013)

2019. D'ici-là, la Plateforme intergouvernementale scientifique et politique sur la biodiversité et les services écosystémiques (IPBES) aura rédigé différents rapports internationaux, régionaux et thématiques sur la biodiversité et les services écosystémiques (de manière analogue au GIEC pour le climat).

## La Suisse: diminution de la biodiversité et des services écosystémiques

Au cours des dernières décennies, la biodiversité a connu une baisse sensible en Suisse (Lachat et al. 2010). Plus d'un tiers des espèces végétales et près de la moitié des espèces animales se trouvent sur la liste rouge des espèces en danger. L'état des habitats protégés, tels que les zones marécageuses ainsi que les prairies sèches et les pâturages, continue à se détériorer. La baisse de la biodiversité est avant tout due aux changements d'affectation des terres, à l'étalement urbain, à la construction d'infrastructures et aux sollicitations provenant des transports, de l'azote et des polluants (perte d'habitats). Les prairies sèches et les pâturages ont ainsi perdu, depuis 1900, 95 pour cent de leur surface (Lachat et al. 2010). En Suisse, la qualité, la quantité et l'interconnexion actuelles de nombreux habitats ne suffisent pas pour en conserver à long terme la

biodiversité et les services écosystémiques. Les surfaces effectivement nécessaires sont nettement plus vastes: en fonction de la région et de l'habitat, on considère environ un tiers de la surface totale comme nécessaire, un taux qui diminue ou qui augmente selon les cas (Guntern et al. 2013). La biodiversité du Plateau, en particulier, a atteint un niveau tellement bas qu'il en est préoccupant. De nombreux services écosystémiques tels que les fonctions de repos, de compensation des changements climatiques et de protection contre les crues n'y sont plus garanties tant la biodiversité y est réduite. Une étude réalisée dans six pays européens a montré que la production de biomasse est plus constante dans les forêts mixtes que dans les monocultures (Jucker et al. 2014) et que le peuplement qui regroupe différentes essences d'arbres fournit généralement plus de services écosystémiques que les monocultures (Van der Plas et al. 2016). Une étude de terrain à grande échelle réalisée dans trois zones en Allemagne a établi, dans la même veine, qu'une intensification de l'utilisation des prairies n'implique pas uniquement une diminution de la biodiversité (Allan et al. 2014), mais aussi une baisse dans la fourniture de nombreux services écosystémiques (Allan et al. 2015).

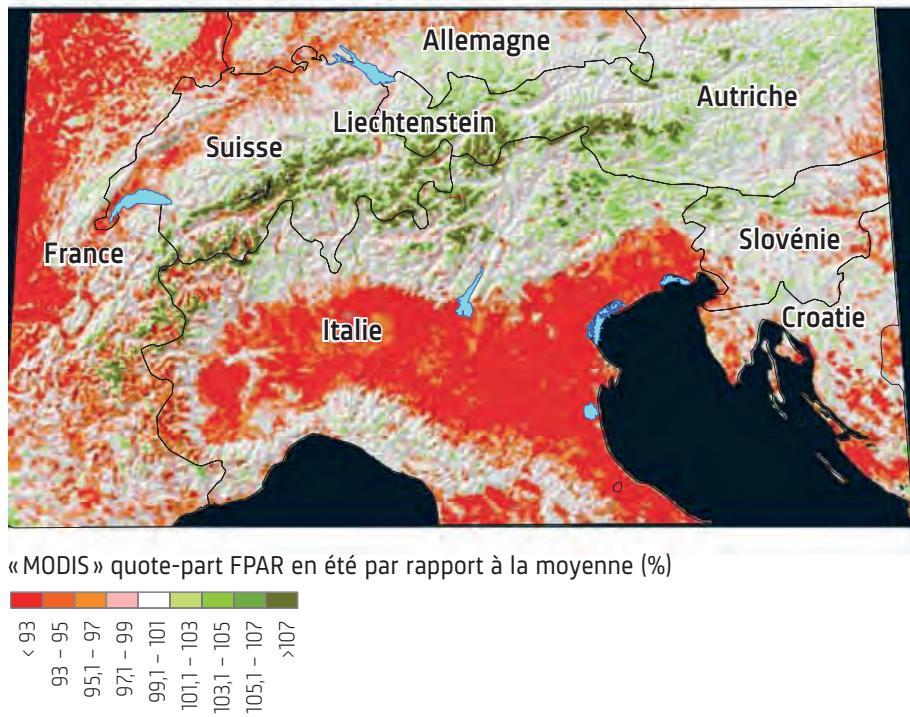


Figure 2.12: Quote-part du rayonnement photosynthétiquement absorbé (FPAR) en été 2003 par rapport à la moyenne sur cinq ans. Les rayonnements sont mesurés par des instruments (« MODIS ») à partir des satellites. Les zones rouges montrent les endroits où le FPAR, et ainsi la croissance des plantes, étaient inférieurs à la moyenne. Les zones vertes correspondent à un FPAR plus élevé et ainsi à une meilleure croissance des plantes. Cette valeur reste inchangée dans les zones blanches.

(Source: Reprinted by permission from John Wiley & Sons Ltd.: Jolly et al. 2005, copyright [2005])

Il n'a pas été possible, jusqu'ici, de stopper la diminution de la biodiversité malgré les efforts supplémentaires consentis (par exemple par le biais de la protection des réserves naturelles ou de la protection des eaux et par une compensation écologique dans l'agriculture). Au contraire, la pression à laquelle est soumise la biodiversité ne cesse d'augmenter en raison de diverses évolutions telles que la croissance démographique, les changements climatiques, une agriculture de plus en plus intensive dans les zones favorables à la culture des champs et aux prairies respectivement à l'abandon des lieux que la topographie rend difficile à exploiter. Un exemple de disparition d'espèces concerne les prairies de fromental (avoine élevée) largement répandues jusqu'au milieu du XX<sup>e</sup> siècle. Une intensification forte a causé leur disparition pratiquement complète et leur remplacement par une prairie pauvre en espèces (de 85 pour cent de toutes les surfaces de prairies autour de 1950, elles ne représentent plus que 2 pour cent aujourd'hui). En outre, le nombre d'espèces caractéristiques pour la prairie de fromental est passé de 25 à 9 (Bosshard 2015). En eau douce, les espèces invasives représentent la cause principale d'une diminution des espèces autochtones. Au cours des 30 der-

nières années par exemple, les invertébrés autochtones (microcrustacés, larves d'insectes, gastéropodes, coquillages, vers) qui peuplaient le lit du Rhin ont été pratiquement tous remplacés par des espèces importées (par. ex. la corbicule asiatique *Corbicula fluminea*; Rey et al. 2005).

## Vulnérabilité

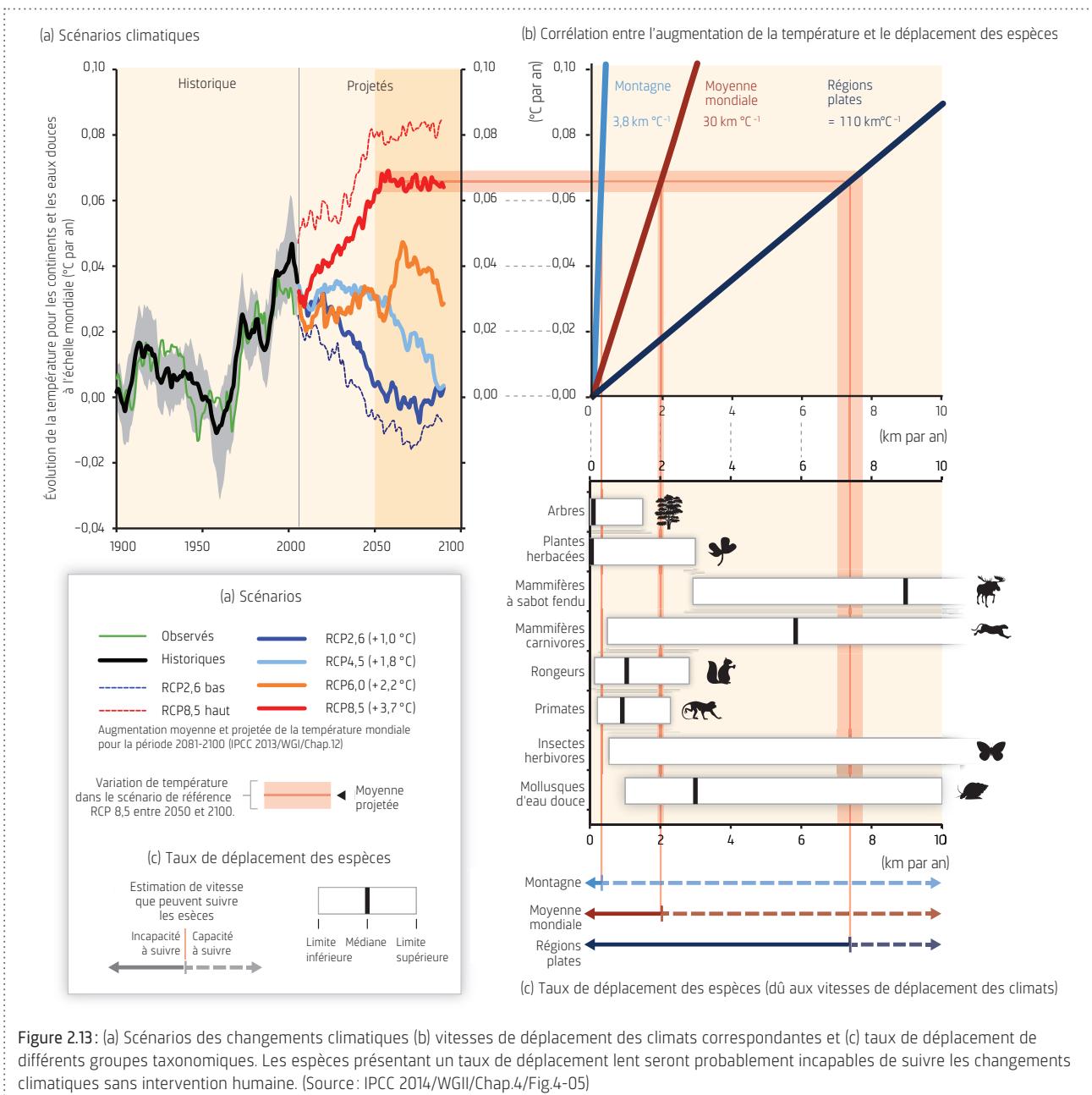
On constate déjà que les changements climatiques agissent sur la majorité des écosystèmes (cf. chap. 2.7 Ecosystèmes alpins, p. 96, chap. 2.9 La forêt, p. 106, chap. 2.10 L'agriculture, p. 111) et que leurs effets sur la biodiversité et les services écosystémiques grandiront encore à l'avenir. Les répercussions de la canicule de 2003 sur la croissance des plantes montrent, de manière exemplaire, que les écosystèmes suisses de faible altitude notamment

sont affectés par les températures extrêmes alors que la croissance des plantes à plus haute altitude peut être meilleure qu'à température normale (fig. 2.12; Jolly et al. 2005).

Les changements climatiques modifient autant la phénologie que la propagation des espèces en Suisse, la tendance correspondant à une migration en altitude. Un grand nombre des espèces étudiées présente un risque élevé de disparaître localement ou totalement, cette évolution étant liée soit directement aux changements climatiques soit à leur combinaison avec d'autres facteurs (Lachat et al. 2010; Bellard et al. 2012; Urban et al. 2012).

De manière générale, les changements climatiques influencent l'habitat des espèces par :

- un déplacement de l'habitat sans que les espèces puissent suivre (fig. 2.13),
- un déplacement des espèces au dehors de leur habitat privilégié ou
- des changements dans la qualité de l'habitat (Urban et al. 2012).



**Figure 2.13:** (a) Scénarios des changements climatiques (b) vitesses de déplacement des climats correspondantes et (c) taux de déplacement de différents groupes taxonomiques. Les espèces présentant un taux de déplacement lent seront probablement incapables de suivre les changements climatiques sans intervention humaine. (Source: IPCC 2014/WGII/Chap.4/Fig 4-05)

## Points de basculement des écosystèmes

Les changements climatiques impliquent certains risques pour les écosystèmes terrestres et d'eau douce ainsi que pour leurs principaux services écosystémiques (IPCC 2014/WGII/Chap.4). Les répercussions des changements climatiques sur la biodiversité sont, pour la plupart, progressifs. Des évolutions soudaines et irréversibles de l'équilibre naturel sont cependant possibles et impliquent un dérèglement substantiel des écosystèmes. On parle dans ce contexte de points de basculement des écosystèmes (*tipping points*) (Secrétariat de la Convention sur la diversité biologique 2014).

L'un des points de basculement les mieux étudiés concerne la disparition de la barrière de corail attendu pour 2050 (IPCC 2014/WGII/Chap.4). Elle est due à la combinaison de pollution, de surpêche, d'espèces invasives et d'acidification des océans (en raison de l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub> et des températures de l'eau). Les écosystèmes arctiques sont également menacés par le dégel du pergélisol, l'invasion de la toundra par les broussailles et la multiplication des maladies et des feux dans les forêts nordiques (*boreal tipping point*, IPCC 2014/WGII/Chap.4). Les possibilités permettant de renverser cette tendance au niveau des forêts sont très limitées. La mortalité des arbres et les pertes forestières augmen-

tent, elles aussi, à de nombreux endroits et sont, dans de nombreux cas, directement liées à des effets climatiques et indirectement à d'autres effets (hausse des agents pathogènes et des nuisibles) (cf. chap. 2.9 La forêt, p. 106).

## Changements progressifs et adaptation

Les modèles climatiques prévoient que de nombreuses espèces seront concernées, ces prochaines décennies, par de lents changements de l'habitat dus au changement climatique (Urban et al. 2012). Des périodes de sécheresse de plus en plus nombreuses, résultats de la baisse pronostiquée des précipitations en été, pourraient, par exemple, avoir pour conséquence que les forêts meurent dans le Moyen-Valais et que les zones de reproduction des batraciens sèchent plus tôt dans l'année (Lachat et al. 2010). Les espèces ayant une faible vitesse de migration sont particulièrement menacées, surtout celles vivant dans les territoires plats (fig. 2.13) où la vitesse des changements climatiques est élevée et celles vivant dans des habitats isolés tels que les sommets, les îles ou les petites réserves naturelles. Dans le cadre du phénomène d'adaptation à un climat plus chaud, de nombreuses espèces de montagne migrent déjà plus haut en altitude. Une analyse des données du Monitoring de la biodiversité en Suisse, récoltées depuis 2003, a montré que les plantes, les papillons, mais aussi les oiseaux ont déjà migré en altitude, en moyenne de 8 mètres, 38 mètres et 42 mètres (Roth et al. 2014). La limite des arbres est, elle aussi, désormais plus haute (cf. chap. 2.7 Ecosystèmes alpins, p. 96, chap. 2.9 La forêt, p. 106).

Parallèlement, les espèces thermophiles peuvent profiter, à plus basse altitude, de températures plus élevées. Dans le Tessin et dans le nord de la Suisse, les hivers plus chauds et plus doux des 30 dernières années ont pour conséquence que la végétation est déjà en train de s'adapter aux nouvelles conditions climatiques. Ainsi, certaines espèces thermophiles sont, par exemple, plus courantes qu'il y a 30 ans. Dans les forêts du Tessin, certaines plantes à feuillage persistant des climats modérés à subtropicaux d'Asie de l'Est sont aujourd'hui relativement fréquentes comme le laurier, le troène du Japon, le palmier chanvre et le cannelier qui sont cultivés dans des jardins d'où ils se propagent (Walther et al. 2001). Certains insectes thermophiles profitent également de ces nouvelles conditions dans le Moyen-Valais. L'azuré de la fauville *Cupido alcetas*, par exemple, a fortement étendu son habitat au cours de la canicule de 2003 (Juillerat 2005).

A long terme, certains habitats pourraient entièrement disparaître suite aux changements climatiques pour ensuite réapparaître (IPCC 2014/WGII/Chap.4). Plusieurs études actuelles montrent que le réchauffement du système cli-

matique a déjà modifié la qualité des habitats et que ces changements vont se poursuivre. Il est difficile d'évaluer l'influence des habitats modifiés sur la fréquence des espèces et le risque de disparition qui les touche puisque certaines espèces sont capables de s'y adapter (IPCC 2014/WGII/Chap.4) ou de côtoyer de nouveaux concurrents en raison des différentes vitesses de migration (fig. 2.13; Alexander et al. 2015). Les espèces qui ont besoin de synchronisme avec d'autres montrent une plus grande sensibilité aux changements des phénomènes périodiques (phénologie), l'une des conséquences les plus rapides du changement climatique. Les interactions entre les espèces sont ainsi interrompues, par exemple, lorsque l'activité des pollinisateurs ne correspond plus à la floraison ou lorsque les bourgeons (chêne pédonculé, *Quercus robur*) n'apparaissent plus au moment où les Chenilles (phalène brumeuse, *Operophtera brumata*), qui se nourrissent de jeunes pousses, sortent de leurs œufs. Ce décalage a pour conséquence que les Chenilles meurent de faim ce qui diminue, à son tour, pour les mésanges et les gobe-mouches, les chances de nourrir leurs petits (Visser & Holleman 2001)

## Les défis à relever pour la Suisse

Pour la Suisse, la préservation et l'utilisation durable de sa biodiversité et des services écosystémiques représentent un défi de taille. Pour un pays à forte densité de population dans les zones habitables, le problème de priorisation des différentes affectations de certains territoires est primordial. Dans le cadre d'accords nationaux et internationaux (entre autres la Convention sur la diversité biologique, le Protocole de Nagoya), la Suisse s'est engagée à protéger la biodiversité et à en assurer une utilisation durable.

La surface nécessaire pour préserver la biodiversité et les services écosystémiques correspond, en Suisse, à près d'un tiers de la surface du pays. Elle dépasse ainsi largement les territoires à valeur écologique aujourd'hui disponibles (Guntern et al. 2013). Il est essentiel de protéger ces surfaces restantes, plusieurs habitats nécessitant cependant des solutions de mise en valeur et de restauration. Les réserves naturelles abritant des espèces pour lesquelles la Suisse assume une responsabilité vont devoir tenir compte de leurs périmètres futurs. L'objectif consiste à sécuriser les corridors de migration, à protéger de nouveaux espaces, à recréer le lien entre des populations isolées et à tisser un réseau dense d'habitats qui répondent aux besoins du plus grand nombre possible d'espèces (Lachat et al. 2010).

La promotion de la biodiversité est absolument essentielle pour les services écosystémiques et la lutte contre

les changements climatiques : l'objectif doit être d'identifier et d'utiliser les synergies. L'une des solutions possibles pour adapter l'utilisation en matière de biodiversité concerne, pour l'agriculture, un ajustement des variétés et l'utilisation de divers mélanges de semences. En foresterie, il est, par exemple, possible d'éviter les essences sensibles au changement climatique telles que le hêtre et l'épicéa à basse altitude (Schelhaas et al. 2015) et d'avoir de plus en plus recours à une mixité des essences. Les solutions efficaces en faveur de la biodiversité impliquent de limiter l'étalement urbain, le changement d'affectation

des habitats, leur pollution et leur surexploitation, de contrôler les espèces invasives, d'élargir les zones protégées, de soutenir l'expansion des habitats et d'assurer une conservation animale ex situ. En avril 2012, le Conseil fédéral a adopté la Stratégie Biodiversité Suisse (OFEV 2012) dont l'objectif est de préserver la biodiversité dans sa richesse et dans sa faculté à réagir aux changements ainsi que de protéger à long terme les services écosystémiques qu'elle fournit. Le plan d'action correspondant est en cours d'élaboration ; il reprend les solutions citées ci-dessus (OFEV 2015).

## Bibliographie

- Alexander JM, Diez JM, Levine JM (2015) **Novel competitors shape species' responses to climate change.** Nature 525: 515–518.
- Allan E et al. (2014) **Interannual variation in land-use intensity enhances grassland multidiversity.** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 111: 308–313.
- Allan E et al. (2015) **Land use intensification alters ecosystem multifunctionality via loss of biodiversity and changes to functional composition.** Ecology Letters 18: 834–843.
- Bellard C, Bertelsmeier C, Leadley P, Thuiller W, Courchamp F (2012) **Impacts of climate change on the future of biodiversity.** Ecology Letters 15: 365–377.
- Bosshard A (2015) **Recul des prairies à frontalier Arrhenatheretum et conséquences sur la biodiversité.** Recherche Agronomique Suisse 6: 20–27.
- Cardinale BJ, Duffy E, Gonzalez A, Hooper DU, Perrings C, Venail P, Narwani A, Mace GM, Tilman D, Wardle DA, Kinzig AP, Daily GC, Loreau M, Grace JB, Larigauderie A, Srivastava DS, Naeem S (2012) **Biodiversity loss and its impact on humanity.** Nature 486: 59–67.
- Fisher B, Turner RK, Morling P (2009) **Defining and Classifying Ecosystem Services for Decision Making.** Ecological Economics 68: 643–653.
- Guntern J, Lachat T, Pauli D, Fischer M (2013) **Flächenbedarf für die Erhaltung der Biodiversität und der Ökosystemleistungen in der Schweiz.** Forum Biodiversité Suisse, Académie des sciences naturelles (SCNAT), Berne.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps.** Geophysical Research Letters 32: L18409.
- Jucker T, Bouriaud O, Avakaritei D, Coomes DA (2014) **Stabilising effects of diversity on aboveground wood production in forest ecosystems: linking patterns and processes.** Ecology Letters 17: 1560–1569.
- Juillerat L (2005) **Extension rapide de l'aire de distribution de Cupido alcetas (Hoffmannsegg 1804) (Lepidoptera, Lycaenidae) en Suisse occidentale en 2003 et 2004.** Bulletin romand d'entomologie 22: 81–95.
- Lachat T, Pauli D, Gonseth Y, Klaus G, Scheidegger C, Vittoz P, Walter T (eds.) (2010) **Wandel der Biodiversität in der Schweiz seit 1900. Ist die Talsohle erreicht?** Zurich, Bristol-Stiftung, Haupt Verlag, Berne.
- Maes J et al. (2013) **Mapping and Assessment of Ecosystems and their Services.** An analytical framework for ecosystem assessments under action 5 of the EU biodiversity strategy to 2020. Publications office of the European Union, Luxembourg.
- Mace G, Masundire H, Baillie J et al. (2005) **Biodiversity.** In: Millennium Ecosystem Assessment. (2005) **Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group.** Ecosystems and Human Well-being, Volume 1. Island Press, Washington DC.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis.** Island Press, Washington DC.
- Newbold T et al. (2015) **Global effects of land use on local terrestrial biodiversity.** Nature 520: 45–50
- OFEV (2012) **Stratégie Biodiversité Suisse.** En exécution de la mesure 69 (objectif 13, art. 14, section 5) du programme de la législature 2007–2011: «Elaborer une stratégie en faveur du maintien et du développement de la biodiversité».
- OFEV (2015) **Rapport de présentation des résultats Consultation préalable Catalogue de mesures du Plan d'action Stratégie Biodiversité Suisse.**
- Rey P, Ortlepp J, Küry D (2005) **Néozoaires invertébrés dans le Haut Rhin (Résumé OFEV).** Cahier de l'environnement 380, Office fédéral de l'environnement, Berne.
- Roth T, Plattner M, Amrhein V (2014) **Plants, Birds and Butterflies: short-term responses of species communities to climate warming vary by taxon and with altitude.** PLOS one: e82490.
- Schelhaas MJ, Nabuurs GJ, Hengeveld G, Reyer C, Hanewinkel M, Zimmermann NE, Cullmann D (2015) **Adaptive forest management to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe.** Regional Environmental Change 15: 1581–1594.
- Schröter D et al. (2005) **Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe.** Science 310: 1333–1337.
- Secretariat of the Convention on Biological Diversity (2014) **Global Biodiversity Outlook 4.** Montréal, 155 pp. [www.cbd.int/GBO4](http://www.cbd.int/GBO4)
- TEEB (2009) **The Economics of Ecosystems and Biodiversity.** Climate Issues Update, 32 p.
- Urban MC, Tewksbury JJ, Sheldon KS (2012) **On a collision course: competition and dispersal differences create no-analogue communities and cause extinctions during climate change.** Proceedings of the Royal Society B 279: 2072–2080.
- Van der Plas F et al. (2016) **Jack-of-all-trades effects drive biodiversity–ecosystem multifunctionality relationships in European forests.** Nature Communications 7: 11109.
- Visser ME, Hollemann LJM (2001) **Warmer springs disrupt the synchrony of oak and winter moth phenology.** Proceedy of the Royal Society B: 268: 289–294.
- Walther G-R, Carraro G, Klötzli F (2001) **Evergreen broad-leaved species as indicators for climate change.** In: G-R Walther, Burga CA, Edwards PJ (eds.), «Fingerprints» of Climate Change – Adapted behaviour and shifting species ranges. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York: 151–162.

## 2.9 La forêt

**La réaction des forêts suisses aux changements progressifs du climat et aux événements extrêmes dépendra beaucoup de l'altitude. Aux étages supérieurs, la forêt gagnera du terrain et croîtra plus rapidement, alors que plus bas elle souffrira de la sécheresse. Les multiples services écosystémiques de la forêt seront déterminés par une combinaison d'effets complexes liés aux changements de l'utilisation du sol, aux chablis, aux feux de forêt, aux infestations par des insectes et aux attaques fongiques.**

Andreas Rigling (WSL), Harald Bugmann (EPF de Zurich), Martine Rebetez (WSL), Christian Körner (Université de Bâle)

### La situation mondiale et nationale

La forêt est une ressource importante et fournit de précieux services. Au niveau mondial, elle joue un rôle de premier plan pour la production de bois, de fibres et de combustible, comme puits de carbone et pour ses effets régulateurs sur le climat. En Suisse les fonctions essentielles de la forêt sont, à part la production de bois, principalement la protection contre les dangers naturels, la biodiversité, le filtrage de l'eau potable et l'utilisation comme zone de détente (Rigling & Schaffer 2015). Le changement climatique met ces services sous pression. De nombreuses espèces d'arbres sont certes en mesure de supporter des événements isolés de courte durée, tels qu'un été sec. Mais elles sont sensibles à la répétition de ces situations extrêmes. En outre, les changements progressifs du climat peuvent également avoir des effets négatifs à long terme sur les services de la forêt.

### La réaction au changement climatique dépend du site

Le changement climatique transformera la forêt tant au niveau mondial que régional. Ses effets différeront fortement d'un lieu à l'autre, car suivant le site considéré, les changements des conditions climatiques ont une action stimulante ou inhibitrice sur les processus écologiques (IPCC 2014/WGII). En Suisse, les forêts situées dans la zone proche de leur limite maximale d'altitude profiteront des conditions plus chaudes (Körner 2012); par contre, leur croissance reculera dans les sites qui sont aujourd'hui déjà chauds et secs (Bugmann et al. 2014; Elkin et al. 2013). Dans les endroits bien pourvus en eau, de nombreuses espèces d'arbres bourgeonneront plus tôt, alors que dans les emplacements secs leur croissance se terminera à un stade plus précoce de la période de végétation. En raison de la hausse des températures et de l'évaporation plus intense qui en résulte, l'exposition à la sécheresse augmentera même sans modification du régime des précipitations.

Les impacts directs, mais aussi les effets indirects du changement climatique feront évoluer la dynamique de la forêt dans le monde et en Suisse. L'augmentation du risque d'incendies de forêt et la recrudescence du bostryche (Temperli et al. 2013) constituent des exemples de ces conséquences indirectes.

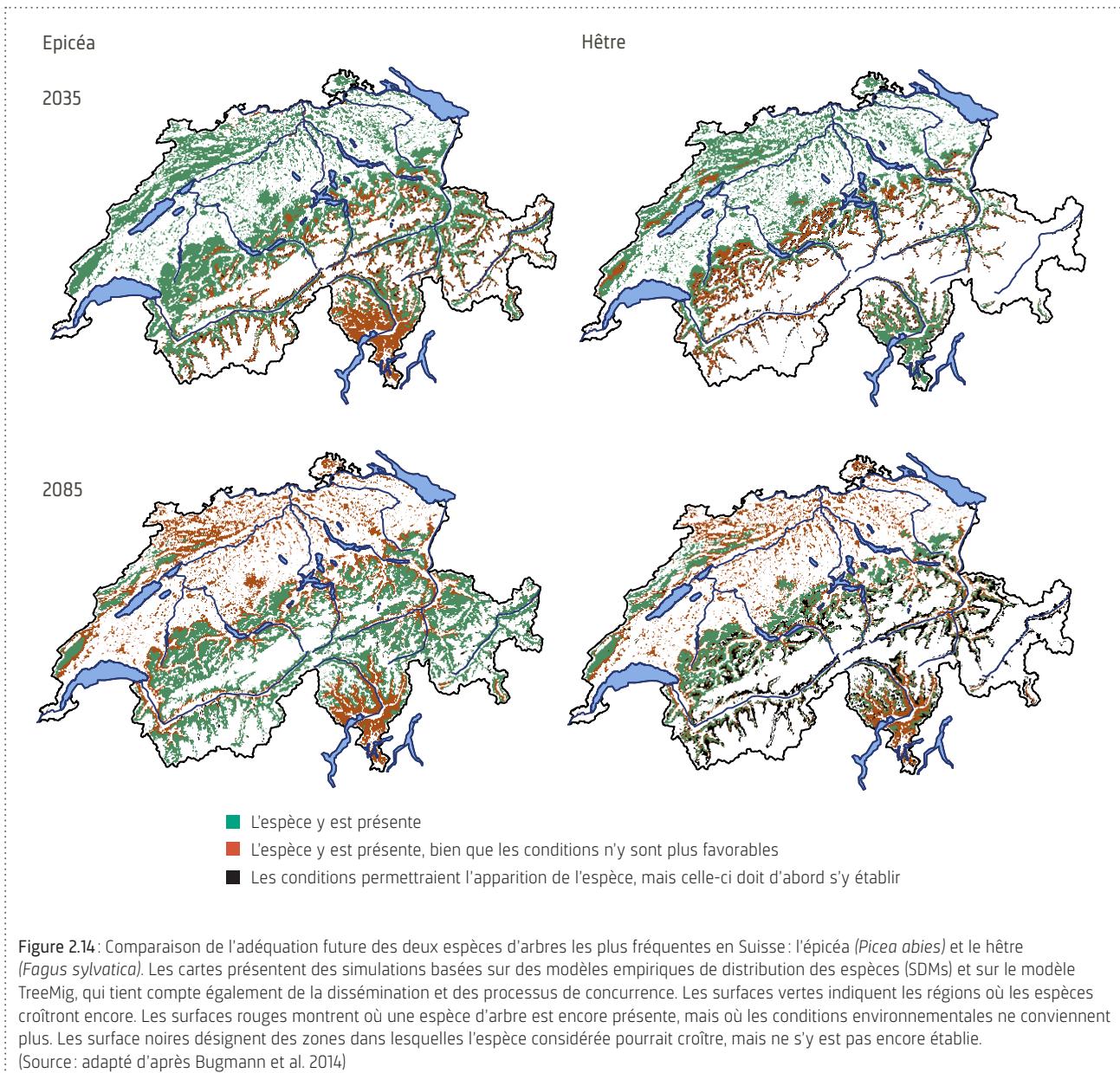
### La vulnérabilité des forêts

#### Les changements progressifs

A long terme, les aires potentielles de répartition des espèces d'arbres en Suisse se modifieront, mais de grandes incertitudes subsistent dans l'évaluation de ces changements (fig. 2.14). On prévoit néanmoins qu'ils se manifesteront progressivement et avec un certain retard, car même dans des conditions défavorables, les peuplements forestiers peuvent survivre longtemps en étant moins productifs (Elkin et al. 2013).

Dans les Alpes, à l'étage montagnard, d'abondants jeunes peuplements de feuillus tels que chêne, hêtre, érable et tilleul ont récemment été observés nettement au-dessus de la limite de répartition des arbres adultes (Vitasse et al. 2012). Si ces jeunes arbres se maintiennent à long terme, il pourrait s'agir d'une réaction au réchauffement du système climatique, qui est en Suisse d'environ 1,5 degrés Celsius par rapport aux années 1970, soit bien supérieur à la moyenne mondiale de 0,7 degrés Celsius.

Les températures plus élevées améliorent la croissance des arbres aux étages supérieurs et permettent à la forêt de s'étendre à plus haute altitude. Mais cette ascension est très lente : le changement d'utilisation du sol, consécutif à l'abandon des alpages, a pour l'heure un impact plus fort sur les forêts que le changement climatique (Gehrig-Fasel et al. 2007; Küchler et al. 2014). Une manifestation évidente de cette évolution socioéconomique est l'embuissonnement d'anciens pâturages de l'arc alpin, observé en maints endroits entre 1400 et 2200 mètres d'altitude. Cet embuissonnement – surtout par l'aulne vert, à plus haute



**Figure 2.14:** Comparaison de l'adéquation future des deux espèces d'arbres les plus fréquentes en Suisse : l'épicéa (*Picea abies*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*). Les cartes présentent des simulations basées sur des modèles empiriques de distribution des espèces (SDMs) et sur le modèle TreeMig, qui tient compte également de la dissémination et des processus de concurrence. Les surfaces vertes indiquent les régions où les espèces croîtront encore. Les surfaces rouges montrent où une espèce d'arbre est encore présente, mais où les conditions environnementales ne conviennent plus. Les surfaces noires désignent des zones dans lesquelles l'espèce considérée pourrait croître, mais ne s'y est pas encore établie. (Source: adapté d'après Bugmann et al. 2014)

altitude également par des arbustes nains (Bühlmann et al. 2014) – ralentit la régénération naturelle de la forêt dans ces zones qui ont été défrichées au Moyen-Âge.

Non seulement les arbres, mais tous les éléments biotiques des écosystèmes réagissent aux changements progressifs des conditions climatiques. C'est le cas, par exemple, des insectes (Bugmann et al. 2014). Mais chaque espèce le fait à un moment et d'une manière spécifiques – plus tôt ou plus tard, lentement ou rapidement, linéairement ou par paliers. Les espèces indigènes, animales et végétales, ne sont pas seules concernées, celles qui viennent d'ailleurs, souvent de régions plus chaudes, sont toujours plus nom-

breuses, avec des chances accrues de survivre et de s'imposer dans nos écosystèmes (Rigling & Schaffer 2015).

### Les événements extrêmes

La hausse de la limite supérieure de la forêt causée par le changement climatique est en outre ralenti par le fait qu'aux étages supérieurs, le rajeunissement des arbres de la forêt nécessite une succession d'années particulièrement favorables du point de vue climatique (cf. par exemple Hagedorn et al. 2014). Des années extrêmes, telles que 2003 avec son été caniculaire (ProClim 2005, Rebetez et al. 2006), ont stimulé la croissance des arbres

à haute altitude, alors qu'elles l'ont clairement entravée dans de nombreuses forêts du Plateau (Jolly et al. 2005). L'impact des années extrêmement sèches varie donc en fonction du lieu et diffère également suivant les espèces d'arbres. Des observations faites dans des régions sèches, telles que le sud-ouest des Etats-Unis, l'espace méditerranéen et des vallées intra-alpines, montrent que la répétition d'années sèches favorise le dépérissement des arbres, ce qui peut modifier à la longue la composition des espèces. En Suisse, le pin sylvestre souffre de plus en plus de la sécheresse dans les régions sèches du Valais où, par contre, le chêne pubescent se montre robuste et se propage (Rigling et al. 2013; Mina et al. 016). Et dans des régions extra-alpines de basse altitude, le chêne s'accorde mieux des périodes sèches que le hêtre commun, le charme commun, le cerisier et le tilleul (Leuzinger et al. 2005; Scherrer et al. 2011).

L'expérience de ces dernières années montre qu'à basse altitude la pression augmentera encore sur l'épicéa, qui est l'arbre de rapport de l'économie forestière suisse et actuellement la principale matière première de l'industrie de la transformation du bois (Lévesque et al. 2014). Cela non seulement à cause de la sensibilité de cette espèce à l'égard de la sécheresse, mais aussi du fait de l'augmentation des attaques de bostryches. Ces coléoptères, ainsi que d'autres insectes nuisibles, proliféreront non seulement grâce aux températures plus élevées mais également en raison de l'augmentation de la fréquence des tempêtes (Bugmann et al. 2014). En effet celles-ci affaiblissent les peuplements et accroissent la quantité de matériel propice au développement des insectes.

L'évaluation de l'impact de l'évolution du climat sur le devenir de nos forêts doit donc prendre en compte non seulement les risques climatiques, tels que les changements progressifs et les années extrêmes, mais aussi le développement de leur vulnérabilité à l'égard de perturbations telles que les tempêtes, les incendies de forêt, les insectes ravageurs et les attaques fongiques.

## L'adaptation au changement climatique

L'adaptation de la forêt au changement climatique repose sur plusieurs axes (cf. Brang et al. 2014; Rigling & Schäfer 2015).

D'une part, la résistance des écosystèmes forestiers à l'égard des extrêmes climatiques et des risques biotiques tels que les bostryches doit être maintenue et si possible renforcée, afin de diminuer le risque de dépérissement à grande échelle et de préserver les services importants rendus par les forêts. Il s'agit de favoriser les espèces qui résistent bien aux perturbations, qui ont des racines

## Les arbres dans l'espace urbain

Les arbres sont des éléments importants des espaces verts dans l'espace urbain non seulement pour leur esthétique, mais aussi pour la fraîcheur qu'ils dispensent pendant les mois chauds de l'été (cf. chap. 2.13 L'espace urbain, p. 126, chap. 3.8 Stratégies urbaines face au changement climatique, p. 186). Comme l'ont montré des mesures effectuées le 16 juillet 2004 à Bâle, les arbres contribuent à réduire l'effet d'îlot de chaleur dans les villes et les agglomérations. Lors de cette journée caniculaire, la température à la surface de la végétation arborescente des allées et des parcs était de 7 à 16 degrés plus basse que celle des rues sans arbres et même jusqu'à 26 degrés inférieure à celle mesurée sur les toits (Leuzinger et al. 2010). La comparaison entre forêts et prairies démontre de manière saisissante l'effet rafraîchissant de l'ombre apportée par les arbres: cet effet est d'autant plus prononcé qu'il fait plus chaud sur les surfaces dégagées, les forêts les plus efficaces dans ce processus étant celles de feuillus et les forêts mixtes. Durant les 11 jours caniculaires d'août 2003, on a mesuré que dans les forêts, la température de l'air était en moyenne de jusqu'à 5,5 degrés Celsius inférieure à celle des prairies voisines. (Renaud & Rebetez 2009). Les arbres pourraient donc apporter une contribution substantielle à un développement urbain qui soit adapté au changement climatique tout en améliorant la qualité de vie et la diversité biologique.

En Suisse, deux projets pilotes, en cours à Berne et à Sion, étudient la relation entre le changement climatique et l'arborisation urbaine et examinent les possibilités et les limites de la gestion des arbres dans un développement urbain adapté au climat.

profondes et qui sont bien adaptées au site et également d'améliorer la vitalité et la stabilité individuelle des arbres. Les forêts doivent donc être éclaircies de manière ciblée, afin d'obtenir un bon équilibre entre les espèces et de mettre davantage de ressources – eau, nutriments et lumière – à disposition de chaque arbre.

D'autre part, la capacité d'adaptation des forêts doit être améliorée en augmentant la diversité génétique et la variété des essences ainsi qu'en favorisant les espèces les mieux adaptées au site, y compris celles qui seraient encore rares aujourd'hui. De façon générale, le rajeunissement de la forêt devrait promouvoir une population d'arbres capable de s'accorder avec les conditions environnementales attendues.

## La Politique forestière 2020

La Politique forestière 2020 menée par la Confédération vise à harmoniser les exigences écologiques, économiques et sociales posées à la forêt. Elle assure une exploitation durable et crée des conditions générales favorisant l'efficacité et l'innovation dans l'économie forestière et l'industrie du bois. La Politique forestière 2020 fixe onze objectifs. Ils concernent le potentiel d'utilisation du bois, le changement climatique, la fonction protectrice de la forêt, la biodiversité, la surface forestière, la capacité de production de l'économie forestière, les sols forestiers (y compris l'eau potable et la vitalité des arbres), la protection contre les organismes nuisibles, l'équilibre forêt-gibier, l'utilisation de la forêt pour des activités de loisirs et de détente, ainsi que la formation et la recherche (y compris le transfert du savoir). Pour chacun d'eux, la Politique forestière 2020 formule plusieurs lignes stratégiques et propose différentes mesures. Elle charge en premier lieu la Confédération de mettre en œuvre ces dispositions, mais aborde également le rôle des cantons et d'autres acteurs (propriétaires de forêts, exploitants, spécialistes de la forêt, associations etc.). Enfin, elle précise ses effets juridiques et financiers.

## La forêt comme puits de carbone

Une possibilité d'atténuer le changement climatique consiste à optimiser et accroître l'action des forêts comme puits de carbone (IPCC 2014/WGII). Ceci peut être obtenu soit en agrandissant la forêt, soit en augmentant la quantité de carbone stockée par surface de forêt. Il s'agit toutefois de mesures qui ne peuvent être prises qu'une seule fois, sans possibilité de répétition.

En Suisse, la forêt pousse actuellement à grande vitesse dans des pâturages de montagne qui ne sont plus exploités. Elle accumule ainsi de façon durable des quantités supplémentaires de carbone, qui sont toutefois marginales comparées aux émissions fossiles du pays et qui toucheront bientôt à leurs limites. Le stockage d'une plus grande quantité de carbone par surface de forêt va de pair avec un nombre plus élevé de hauts et vieux arbres. Or ceci augmente substantiellement le risque de chablis en cas de tempêtes, ce qui, à son tour, entraîne une hausse des émissions nettes et, à intervalles irréguliers, une forte diminution de la capacité de stockage de la forêt, laquelle devient alors une source de carbone. Il n'est donc pas judicieux, en Suisse, de stocker systématiquement davantage de carbone par surface de forêt, d'autant moins que ce pays est en Europe celui qui possède déjà le plus grand volume de bois par surface de forêt.

Une stratégie durable et efficace consiste à combiner les différents effets d'absorption du carbone par la forêt et le bois. Il s'agit, par une exploitation ciblée, d'assurer un haut niveau de fixation du CO<sub>2</sub> par la forêt en utilisant en permanence du bois pour la fabrication de produits durables. En construisant des maisons en bois par exemple, le carbone fixé dans ce matériau est stocké à long terme et l'on évite en même temps le recours à des matériaux de construction émettant beaucoup de CO<sub>2</sub>.

## Défis pour la Suisse

Les forêts ont une grande longévité et se développent très lentement. Au cours de leur existence, de la plantule jusqu'à la fin de leur vie, les arbres sont exposés à maintes reprises à de multiples risques, tels que des sécheresses extrêmes, des tempêtes et des maladies. Les forêts sont donc sensibles aux modifications intervenant dans leur environnement, et en particulier aux changements climatiques (cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, p. 77). En outre les conditions économiques changent aussi, de même que les attentes de la société à l'égard de la forêt. Ces facteurs peuvent avoir un impact négatif sur les services rendus par la forêt, qui sont, en Suisse, particulièrement variés. La répartition et la diminution des risques constituent un principe fondamental pour faire face aux incertitudes. Répartir les risques signifie ici promouvoir la diversité des espèces d'arbres, des structures de la forêt et des ressources génétiques. Par ailleurs, une exploitation adaptée aux sites et éventuellement la réduction de l'âge maximal des forêts de production peuvent réduire le risque de dommages forestiers de grande envergure (Rigling & Schaffer 2015). Des compromis au sujet des divers services de la forêt sont indispensables. Cela presuppose notamment un changement de paradigme dans les forêts de production, pour donner la priorité à la réduction à long terme des risques, quitte à assumer temporairement des pertes en matière de production de bois. Mais ceci entre en conflit avec la situation financière actuellement déjà difficile de nombreux propriétaires de forêts et entreprises forestières, quoi sont tributaires à courte ou moyenne échéance, des recettes tirées de la vente du bois.

## Bibliographie

- Bircher N, Cailleret M, Bugmann H (2015) **The agony of choice: different empirical mortality models lead to sharply different future forest dynamics.** Ecological Applications 25: 1303–1318.
- Brang P, Spathelf P, Larson JB, Boncina A, Chauvin C, Drössler L, Garcia-Güemes C, Heiri C, Kerr G, Lexer MJ, Mason B, Mohren F, Mühllethaler U, Nocentini S, Svoboda M (2014) **Suitability of close-to-nature silviculture for adapting temperate European forests to climate change.** Forestry 87: 492–503.
- Bugmann H, Brang P, Elkin C, Henne P, Jakoby O, Lévesque M, Lischke H, Psomas A, Rigling A, Wermelinger B, Zimmermann NE (2014) **Climate change impacts on tree species, forest properties, and ecosystem services.** In: CH2014-Impacts, Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland. OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland: 79–88.
- Bühlmann T, Hiltbrunner E, Körner C (2014) ***Alnus viridis* expansion contributes to excess reactive nitrogen release, reduces biodiversity and constrains forest succession.** Alpine Botany 124: 187–191.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** www.ipcc.ch/report/ar5/wg2
- Elkin C, Gutierrez AG, Leuzinger S, Manusch C, Temperli C, Rasche L, Bugmann H (2013) **A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps.** Global Change Biology 19: 1827–1840.
- Gehrig-Fasel J, Guisan A, Zimmermann NE (2007) **Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment?** Journal of Vegetation Science 18: 571–582.
- Hagedorn F, Shiyatov FG, Mazepa VS, Devi NM, Grygoriev AA, Bartysh AA, Fomin V, Kapralov D, Terentiev M, Bugman H, Rigling A, Moiseev PA (2014) **Treeline advances along the Urals mountain range – driven by improved winter conditions?** Global Change Biology 20: 3530–3543.
- Jolly WM, Dobbertin M, Zimmermann NE, Reichstein M (2005) **Divergent vegetation growth responses to the 2003 heat wave in the Swiss Alps.** Geophysical Research Letters 32: L18409.
- Körner C (2012) **Alpine treelines.** Springer, Basel.
- Küchler M, Küchler H, Bedolla A, Wohlgemuth T (2014) **Response of Swiss forests to management and climate change in the last 60 years.** Annals of Forest Science 72: 311–320.
- Leuzinger S, Zotz G, Asshoff R, Körner C (2005) **Responses of deciduous forest trees to severe drought in Central Europe.** Tree Physiology 25: 641–650.
- Leuzinger S, Vogt R, Körner C (2010) **Tree surface temperature in an urban environment.** Agricultural and Forest Meteorology 150: 56–62.
- Lévesque M, Rigling A, Bugmann H, Weber P, Brang P (2014) **Growth response of five co-occurring conifers to drought across a wide climatic gradient in Central Europe.** Agricultural and Forest Meteorology 197: 1–12.
- Mina M, Martin-Benito D, Bugmann H, Cailleret M (2016) **Forward modeling of tree-ring width improves simulation of forest growth responses to drought.** Agricultural and Forest Meteorology 221: 13–33.
- OFEV (2014) **Projets pilotes adaptation aux changements climatiques: Cluster «Développement urbain adapté aux changements climatiques».** www.bafu.admin.ch/adaptation-climat
- OFEV (2015) **Politique forestière 2020.** www.bafu.admin.ch/forets
- ProClim (ed.) (2005) **Canicule de l'été 2003.** Rapport de synthèse. Berne, 28 pp.
- Rebetez M, Mayer H, Dupont O, Schindler D, Gartner K, Kropp J, Menzel A, (2006) **Heat and drought 2003 in Europe: a climate synthesis.** Annals of Forest Science 63: 569–577.
- Renaud V, Rebetez M (2009) **Comparison between open-site and below-canopy climatic conditions in Switzerland during the exceptionally hot summer 2003.** Agricultural and Forest Meteorology 149: 873–880.
- Rigling A, Bigler C, Eilmann B, Mayer P, Ginzler C, Vacchiano G, Weber P, Wohlgemuth T, Zweifel R, Dobbertin M (2013) **Driving factors of a vegetation shift from Scots pine to pubescent oak in dry Alpine forests.** Global Change Biology 19: 229–240.
- Rigling A, Schaffter HP (eds.) (2015) **Forest Report 2015. Condition and Use of Swiss Forests.** Federal Office for the Environment (FOEN), Bern, Swiss Federal Research Institute for Forest, Snow and Landscape (WSL), Birmensdorf, 143 pp.
- Scherrer D, Bader MKF, Körner C (2011) **Drought-sensitivity ranking of deciduous tree species based on thermal imaging of forest canopies.** Agricultural and Forest Meteorology 151: 1632–1640.
- Temperli C, Bugmann H, Elkin C (2013) **Cross-scale interactions among bark beetles, climate change, and wind disturbances: a landscape modeling approach.** Ecological Monographs 83: 383–402.
- Vitasse Y, Hoch G, Randin CF, Lenz A, Kollas C, Körner C (2012) **Tree recruitment of European tree species at their current upper elevational limits in the Swiss Alps.** Journal of Biogeography 39: 1439–1449.
- WSL (2015) **Portree – A portrait of Central European tree species for Switzerland.** www.wsl.ch/lud/portree

## 2.10 L'agriculture

**Le changement climatique augmente le risque de pertes de récolte dans d'importants secteurs de la production agricole, ce qui a des conséquences négatives pour la sécurité alimentaire de la population des pays pauvres. En Suisse, on s'attend, à court terme, à des effets positifs aussi bien que négatifs sur les rendements agricoles, mais à long terme, le risque de pertes dues à la chaleur et à la sécheresse augmentera aussi.**

Jürg Fuhrer (*Agroscope*)

### La situation mondiale et nationale

Le potentiel de production de l'agriculture est déterminé surtout par le régime local et régional des températures et des précipitations. En outre, la production actuelle subit l'influence des variations d'année en année des conditions météorologiques. Mais il est difficile de subordonner les tendances et la variabilité des rendements agricoles à des grandeurs climatiques spécifiques: d'une part, ces rendements dépendent de nombreux facteurs qui tiennent principalement à l'exploitation; d'autre part, les séries de données à disposition sont le plus souvent limitées dans le temps. Néanmoins, le lien entre données climatiques et rendements peut être analysé indirectement au moyen de modèles statistiques ou mécanistes.

### Rendements agricoles en baisse dans le monde entier

Comparées aux calculs antérieurs (quatrième rapport d'évaluation du GIEC sur l'état du savoir), les modélisations les plus récentes, selon le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, fournissent des indices plus nets de baisses du rendement agricole dues au changement climatique dans la plupart des zones de culture – quelques régions septentrionales font exception. Le blé et le maïs sont particulièrement concernés, dans une moindre mesure le riz. Cela signifie que la montée de la température pendant les dernières décennies, éventuellement en combinaison avec un manque d'eau, a déjà provoqué une diminution des rendements agricoles et que ses effets négatifs sur la production l'emportent sur ses effets positifs. Cette évolution se manifeste concrètement dans le cas du maïs en Chine et au Brésil et dans celui du blé en Inde, en Russie et en France (Lobell et al. 2011). En outre, un tiers des variations annuelles des rendements agricoles dans le monde pendant ces dernières décennies peut s'expliquer statistiquement par des variations du climat, et même plus de 60 pour cent dans quelques importantes régions de production, par exemple dans le Midwest des Etats-Unis, en Australie, ou encore en Chine dans des zones de culture du maïs (Ray et al. 2015).

Des vagues de chaleur et des périodes de sécheresse dans d'importantes régions de production ont causé passagèrement des chutes de rendement qui ont entravé l'approvisionnement alimentaire entre autres dans des parties de l'Asie et de l'Afrique. Une telle situation s'est présentée récemment pour le blé et le riz en Russie, aux Etats-Unis et en Australie. Associés à d'autres facteurs, tels que l'augmentation de la production de biocarburants, de tels événements ont contribué à une hausse des prix des denrées alimentaires sur le marché mondial, ce qui a restreint l'accès de la population de pays importateurs pauvres aux denrées alimentaires de base (Willembockel 2012). En revanche, les producteurs ont profité de prix plus élevés.

### En Suisse, certaines décisions politiques ont eu jusqu'ici plus d'influence que le changement climatique

En Suisse, l'augmentation de la température depuis 1980 n'a guère eu d'influence sur les rendements des cultures

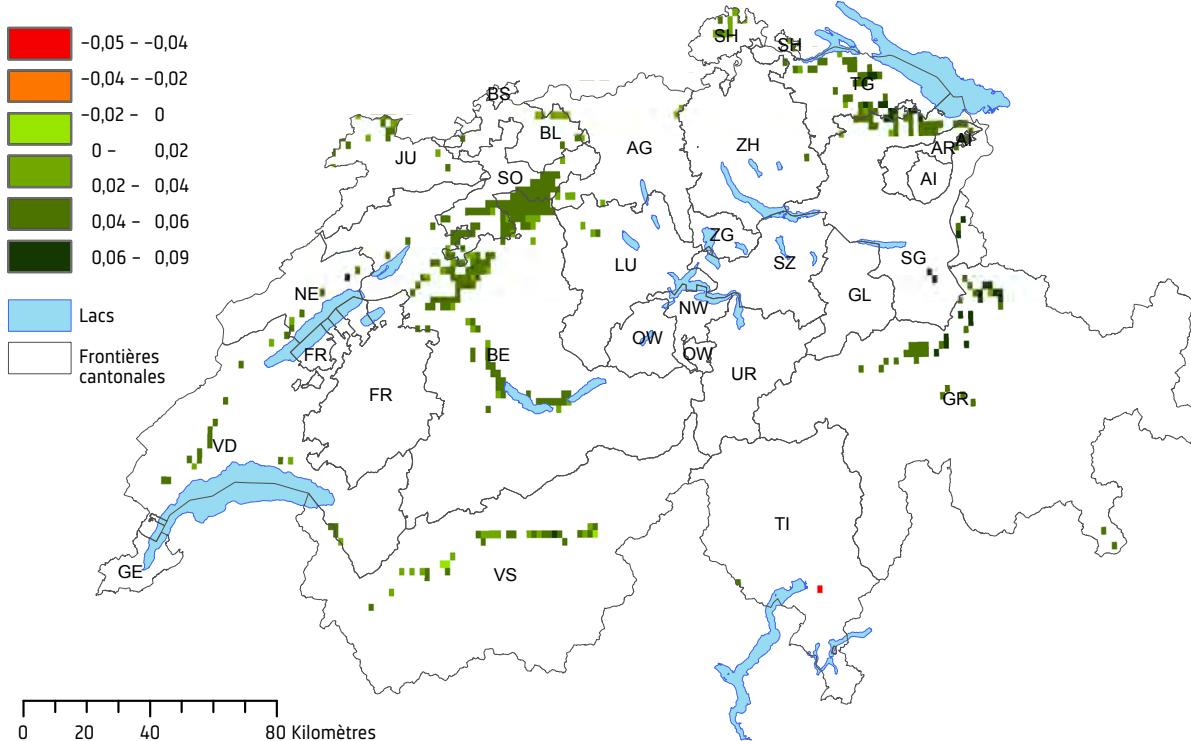
### L'alimentation mondiale

La production mondiale de denrées alimentaires porte sur un nombre limité d'espèces végétales: 150 environ, dont douze fournissent à peu près les deux tiers des denrées consommées. Trois couvrent à elles seules plus de la moitié des besoins énergétiques : le maïs, le blé et le riz. Le sorgho et le millet, la pomme de terre, la patate douce, le soja et la canne à sucre en assurent 25 autres pour cent.

Aujourd'hui, 62 pour cent de la production mondiale des cultures arables sert à l'alimentation humaine, 35 pour cent à celle des animaux et 3 pour cent à la production d'énergie et d'autres biens industriels.

En 2050, plus de neuf milliards d'êtres humains vivront sur la planète. Ils auront besoin de plus de nourriture; avec l'amélioration du niveau de vie, ils consommeront davantage de viande et de produits laitiers, dont la production nécessite nettement plus de ressources que celle des plantes.

**a) Changements décennaux de l'aptitude climatique pour le maïs grain**



**b) Changements décennaux de l'aptitude climatique pour le blé d'hiver**

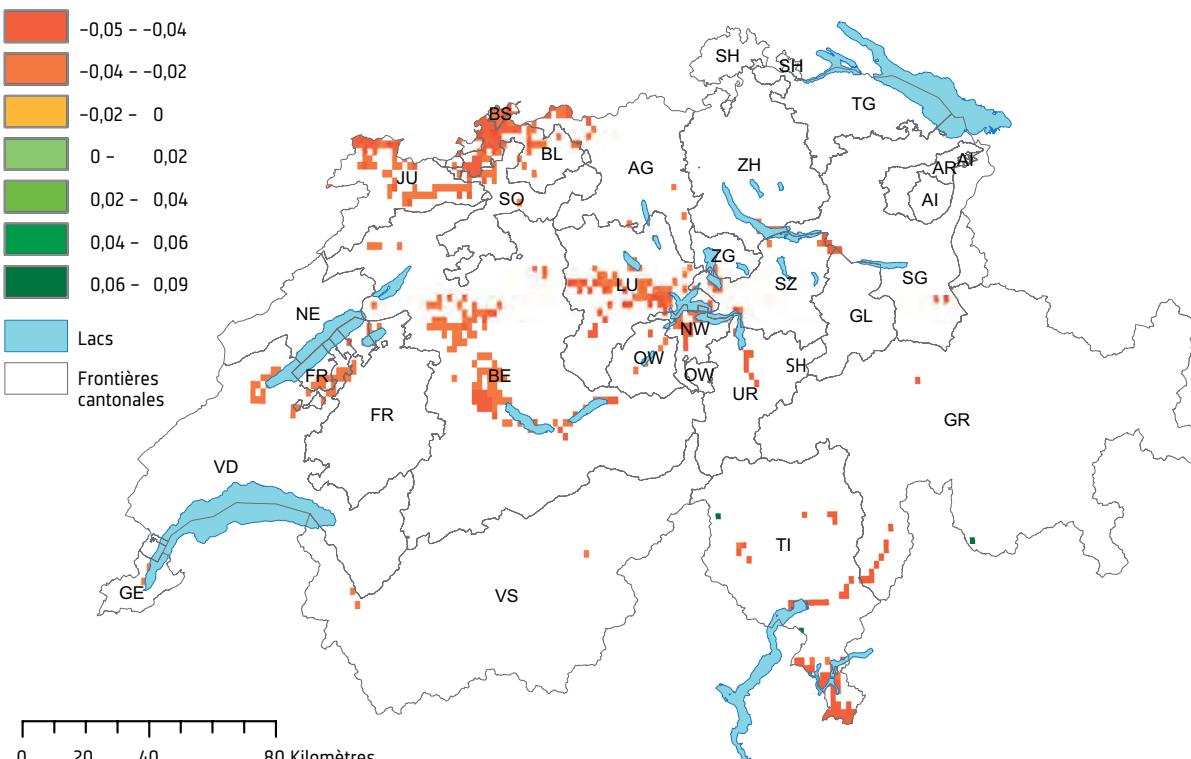
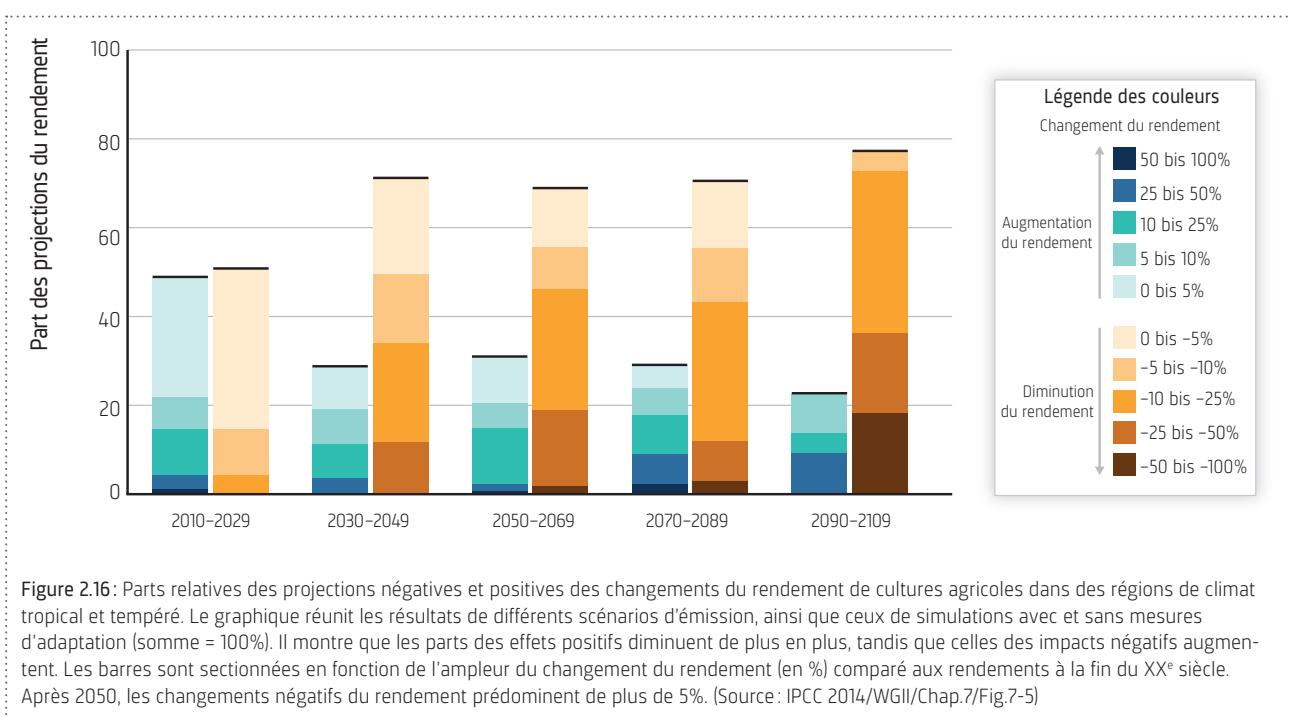


Figure 2.15: Changement de l'indice d'aptitude climatique pour le maïs (a) et le blé (b) dans des régions où il présente une tendance significative de 1983 à 2010. (Source: Holzkämper et al. 2014)



**Figure 2.16:** Parts relatives des projections négatives et positives des changements du rendement de cultures agricoles dans des régions de climat tropical et tempéré. Le graphique réunit les résultats de différents scénarios d'émission, ainsi que ceux de simulations avec et sans mesures d'adaptation (somme = 100%). Il montre que les parts des effets positifs diminuent de plus en plus, tandis que celles des impacts négatifs augmentent. Les barres sont sectionnées en fonction de l'ampleur du changement du rendement (en %) comparé aux rendements à la fin du XX<sup>e</sup> siècle. Après 2050, les changements négatifs du rendement prédominent de plus de 5%. (Source: IPCC 2014/WGII/Chap.7/Fig.7-5)

agricoles. Cependant, la modélisation de l'aptitude climatique de cultures spécifiques indique que de 1980 à 2010 les conditions ont tendu, dans différentes régions, à s'améliorer pour le maïs et à se dégrader pour le blé d'hiver (fig. 2.15). L'aptitude climatique pour la culture de la vigne s'est également améliorée pendant ces 30 dernières années et des variétés de raisin particulièrement exigeantes profitent de températures en hausse (Holzkämper et al. 2013). En ce qui concerne les rendements de céréales, l'effet de décisions politiques, telles que les paiements directs écologiques, est plus manifeste que l'influence du changement climatique (Finger 2010).

En Suisse, pendant le passé récent, les années caractérisées par des conditions météorologiques extrêmes n'ont entraîné que rarement des changements notables de l'offre et des prix des produits agricoles. Ce sont avant tout des produits régionaux, par exemple les légumes, qui ont été touchés par des hausses de prix. Des pertes de production comme en 2003 ont été compensées en partie par des importations et allégements d'importation supplémentaires (suspension de droits de douane sur les aliments pour animaux); dans les cas de rigueur, des prêts ont été accordés à titre d'aide aux exploitations. Les paiements directs de la Confédération atténuent en outre les fluctuations des résultats des entreprises agricoles (Lehmann et al. 2013).

## La vulnérabilité

### Changements futurs

L'évolution des changements à venir de la production agricole mondiale en fonction du climat a été évaluée en combinant des modèles de production avec des projections du climat régional. Les incertitudes ayant trait à l'évolution des émissions et du climat, aux développements des techniques agricoles et aux modèles relativisent toutefois les résultats obtenus (Rosenzweig et al. 2014). La grande majorité des études montrent que les tendances positives et négatives des rendements agricoles s'équilibreront plus ou moins pendant les prochaines décennies (2010-2029) (fig. 2.16). Mais si l'évolution des émissions n'est pas freinée (RCP8,5), les effets négatifs augmenteront nettement à moyen terme (2046-2065) dans de nombreuses régions tempérées des latitudes moyennes et surtout dans les zones tropicales, tandis que des effets positifs sont attendus aux latitudes septentrionales. Vers la fin du siècle, les impacts négatifs sur les rendements prédominent largement dans les projections.

En Suisse, dans le même horizon temporel, le réchauffement devrait avoir des effets positifs sur la culture du maïs, pour autant que la sécheresse ne limite pas les rendements plus fréquemment et à plus large échelle. L'aptitude climatique se développera positivement également pour la vigne (Holzkämper et al. 2013). Le réchauffement aura un impact plutôt négatif sur d'autres cultures, par exemple celles du blé d'hiver et de la pomme de terre.

Avec la hausse des températures, la pression des ravageurs devrait également s'accentuer. Ce risque a été peu étudié jusqu'ici. Des premiers résultats pour le carpocapse des pommes montrent toutefois qu'à l'avenir, il faudra compter dans toutes les régions avec deux à trois générations successives par an au lieu d'une aujourd'hui (Hirschi et al. 2012). D'autre part, la barrière de froid que constitue la crête des Alpes devient plus étroite et donc plus facile à franchir par des espèces invasives, comme cela a été montré pour la mouche des brous du noyer (Aluja et al. 2011).

Le changement climatique concerne aussi la production animale. Les études effectuées jusqu'à maintenant ont accordé nettement moins d'attention à ce domaine qu'à celui de la production végétale. Ceci bien que des effets négatifs importants soient attendus pour la production de fourrage, la santé animale ainsi que la quantité et la qualité des produits animaux (IPCC 2014/WGII/Chap.7). En Suisse, pays avec une forte proportion de prairie et une importante production animale et laitière, il faut être très attentif aux risques que les animaux de rapport ont à subir du fait de l'augmentation du stress thermique (Fuhrer & Calanca 2012). Le réchauffement prolonge certes la période de végétation, ce qui a une influence positive sur la production de fourrage et l'exploitation des prairies pour autant que l'irrigation soit suffisante en période de sécheresse (Calanca & Fuhrer 2005). Mais des mesures de prévention doivent être prises pour protéger les animaux contre le stress thermique et le manque d'eau, afin de diminuer le risque de pertes de rendement, de maladies ou même d'une hausse de la mortalité.

## Des extrêmes ont un impact sur le commerce mondial des produits agricoles

Avec la progression du changement climatique, les effets négatifs sur l'agriculture s'intensifieront dans le monde entier et les rendements des cultures deviendront moins stables. Il est prévisible que les extrêmes de température survenant dans la foulée du changement climatique dépasseront plus fréquemment la limite de tolérance de la plupart des cultures arables. Le changement climatique pourrait ainsi atteindre un niveau critique pour une production agricole mondiale suffisante. En dépit d'effets d'adaptation économique, des rendements plus bas et variables dans les principaux pays producteurs entraînent des hausses de prix sur le marché mondial (Nelson et al. 2014) et de plus fortes fluctuations des prix (Calzadilla et al. 2013). Ceci s'ajoutant à l'évolution mondiale des exigences touchant à la disponibilité et qualité des denrées alimentaires (entre autres une consommation accrue de protéines animales), la sécurité alimentaire est mise en danger pour une proportion croissante de la population du globe. Si la production agricole continue de baisser

à cause du changement climatique et que ses fluctuations annuelles s'accentuent, le nombre d'êtres humains sous-alimentés augmentera sensiblement d'ici 2050 (WHO 2014). Dans beaucoup de régions, cette évolution contrecarrerait les efforts en cours visant à améliorer la situation alimentaire. Les enfants vivant dans des parties de l'Afrique et de l'Asie du Sud seraient particulièrement concernés (Brown 2014). On s'attend d'autre part à ce que la qualité du régime alimentaire de nombreuses personnes se dégrade du fait du changement climatique ; le nombre de décès liés à l'alimentation augmenterait alors d'ici 2050 dans de nombreuses régions (Springmann et al. 2016).

La situation deviendrait particulièrement difficile après 2050 si l'évolution des émissions n'est pas freinée (RCP8,5), le réchauffement atteindrait alors quatre degrés en moyenne à la fin du siècle et serait accompagné de fréquents extrêmes. Simultanément, la demande en produits animaux continuera d'augmenter dans le monde entier, en particulier dans des pays émergents où une forte croissance démographique s'ajoute à des exigences grandissantes en matière de qualité des denrées alimentaires.

## L'adaptation

Des mesures d'adaptation peuvent contrer en partie les effets négatifs de l'évolution du climat et aider à tirer parti des effets positifs. Dans la pratique agricole, il est possible de prendre entre autres les dispositions suivantes (cf. Fuhrer & Gregory 2014) :

- Planter et utiliser un large spectre de variétés présentant une meilleure tolérance à la chaleur, à la sécheresse et aux ravageurs.
- Décaler les périodes de culture.
- Irriguer plus abondamment en pratiquant une gestion durable de l'eau.
- Travailler le sol avec ménagement pour améliorer son régime hydrique.
- Introduire des systèmes agro-forestiers, c'est-à-dire une combinaison de plantes ligneuses vivaces et de cultures agricoles.
- Soutenir la prise de décision par des informations ciblées.

Des modélisations montrent que de telles mesures, adaptées aux conditions et aux besoins locaux, permettent de réduire les pertes de rendement dues au climat (Challinor et al. 2014). De nombreuses mesures d'adaptation ont un caractère général et jouent un rôle toujours plus important aussi bien à l'étranger qu'en Suisse. L'eau est une ressource limitée aussi dans notre pays. Si la demande en eau augmente en raison d'un climat plus chaud et plus sec, il devient particulièrement important d'utiliser ce précieux

liquide avec ménagement en recourant à des techniques efficaces et à une gestion opérationnelle adaptée à la situation (Fuhrer et al. 2013). Il faut en même temps prévenir les effets d'une augmentation des fortes précipitations. D'où la nécessité de mesures telles que travailler le sol avec ménagement pour empêcher l'érosion.

Les adaptations des systèmes de production peuvent être réalisées au fur et à mesure, par ordre de priorité, au niveau régional ou local. Elles vont de modifications à l'intérieur de structures existantes à des transformations en profondeur. Ces dernières incluent la diversification des entreprises agricoles et le déplacement des zones de culture. L'augmentation des réserves, la diversification de la production, des adaptations en matière de stockage et de distribution des denrées alimentaires de base ainsi qu'une amélioration de la couverture d'assurance des producteurs sont autant de mesures importantes pour lutter contre les variations croissantes de production.

L'ampleur du potentiel d'évitement d'effets négatifs du changement climatique n'est pas bien connue. Elle pourrait être nettement supérieure à ce qui est admis selon l'état actuel du savoir. L'augmentation de la faculté d'adaptation prend une importance particulière dans les régions économiquement faibles; elle implique le développement du transfert du savoir et nécessite des investissements, des améliorations des structures politiques et sociales et une simplification de l'accès aux marchés.

En Suisse, les possibilités d'adaptation sont comparativement grandes et les mesures à prendre dans l'agriculture peuvent être stimulées par des systèmes d'incitations, par les conditions d'attribution des paiements directs et par la politique des prix. La question d'une couverture d'assurance contre les risques météorologiques est discutée de plus en plus sérieusement. Les bases pour des assurances indicielles contre les dommages dus à la sécheresse ont été élaborées (Kapphan et al. 2012) et les premiers produits de ce genre voient le jour (Suisse Grêle 2016). En outre, le développement d'infrastructures efficaces en matière d'irrigation est en planification dans certaines régions, par exemple dans le Seeland bernois. Il prévoit des réseaux d'irrigation à faible perte raccordés à d'importants réservoirs tels que de grosses rivières et des lacs, la gestion des quantités d'eau pour qu'elles correspondent aux besoins effectifs, ainsi qu'une distribution de ce précieux liquide près du sol, par exemple par irrigation goutte-à-goutte.

## Défis pour la Suisse

En Suisse, la part nette<sup>1</sup> des besoins intérieurs produite dans le pays en 2012, exprimée en termes de quantité d'énergie, s'est élevée à environ 55 pour cent. En comparaison avec l'UE, c'est un faible taux d'auto-provisionnement. La Suisse importe principalement des produits végétaux, tels que fruits, légumes, céréales et matières grasses, et ceci la plupart du temps de pays de l'UE. La croissance démographique du pays va de pair avec des besoins alimentaires grandissants. Il s'ensuit que pour maintenir le taux net d'auto-provisionnement en dépit de la diminution de la surface affectée à l'agriculture, il faut accroître la productivité. Sans quoi la dépendance à l'égard des importations de denrées alimentaires et de fourrage continuera d'augmenter, tout comme l'influence des fluctuations de prix sur les marchés agricoles internationaux. Le défi est d'obtenir cette hausse de la productivité en ménageant les ressources naturelles (sol, eau, air et climat) et la diversité biologique et d'amortir en même temps les effets économiques négatifs du changement climatique tout en exploitant de nouvelles possibilités. Des émissions de gaz à effet de serre particulièrement élevées sont associées aux produits animaux (viande et produits laitiers), dont la part importée est faible en comparaison des produits végétaux (Bretscher et al. 2014). Une évolution vers une alimentation toujours plus végétarienne serait donc favorable à la Suisse.

L'une des priorités de la Suisse est la gestion future des ressources en eau.<sup>2</sup> Aujourd'hui déjà, on recourt à l'irrigation sur le Plateau, au Tessin et dans les vallées intra-alpines (Fuhrer & Jasper 2009). Dans de nombreux bassins versants des Préalpes, les écoulements estivaux diminueront (Köplin et al. 2012; Fuhrer & Calanca 2014) (cf. chap. 2.4 Eau, p. 84). Un besoin croissant d'irrigation pour assurer le rendement et la qualité des cultures arables et des cultures spéciales (fruits et vigne) ainsi que du fourrage augmentera la concurrence avec d'autres utilisateurs pour l'accès à une offre en eau toujours plus faible (Lanz et al. 2014). Des remaniements de la combinaison des cultures agricoles vers davantage de variétés d'hiver, telles que le colza ou l'orge d'hiver, et un travail de la terre ménageant la structure du sol et favorisant la retenue d'eau sont, en plus de l'amélioration de l'efficacité de l'irrigation, des possibilités de diminuer les besoins d'irrigation.

Mais il faut aussi repenser l'organisation du paysage rural: des cultures exigeantes devraient être plantées là où le climat et le sol offrent des conditions qui s'y prêtent et où un accès durable à des ressources en eau est assuré. En outre, l'évolution du prix ou le contingentement de l'eau

<sup>1</sup> Net signifie ici que l'on n'a considéré que la part de la production suisse produite avec des fourrages indigènes

<sup>2</sup> Voir aussi [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)

peuvent inciter des entreprises agricoles à prendre des mesures pour réduire leur consommation de ce précieux liquide. La surexploitation des ressources en eau pourrait être ainsi évitée à l'avenir, de même que les impacts envi-

ronnementaux qu'elle implique, sans diminuer substantiellement le résultat des entreprises (Fuhrer et al. 2013).

## Bibliographie

- Aluja M, Guillén L, Rull R, Höhn H, Frey J, Graf B, Samietz J (2011) **Is the alpine divide becoming more permeable to biological invasions? – Insights on the invasion and establishment of the Walnut Husk Fly, *Rhagoletis completa* (Diptera: Tephritidae) in Switzerland.** Bulletin of Entomological Research 101: 451–465.
- Brettscher D, Leuthold-Stärfl S, Felder D, Fuhrer J (2014) **Emissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture et la filière alimentaire en Suisse.** Recherche Agronomique Suisse 5: 458–465.
- Brown ME (2014) **Food Security, Food Prices and Climate Variability.** Routledge, New York.
- Calzadilla A, Rehdanz K, Betts R, Falloon P, Wiltshire A, Tol RSJ (2013) **Climate change impacts on global agriculture.** Climatic Change 120: 357–374.
- Challinor AJ, Watson J, Lobell DB, Howden SM, Smith DR, Chhetri N (2014) **A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation.** Nature Climate Change 4: 287–291.
- Finger R (2010) **Evidence of slowing yield growth – the example of Swiss cereal yields.** Food Policy 35: 175–182.
- Fuhrer J, Calanca P (2012) **Le changement climatique influence le bien-être des vaches laitières.** Recherche Agronomique Suisse 3: 132–139.
- Fuhrer J, Calanca P (2014) **Irrigation et changement climatique: une analyse régionale du déficit en eau.** Recherche Agronomique Suisse 5: 256–263.
- Fuhrer J, Gregory PJ (eds.) (2014) **Climate Change Impact and Adaptation in Agricultural Systems.** CABI Climate Change Series.
- Fuhrer J, Jasper K (2009) **Besoin en eau d'irrigation des herbages et des cultures avec le climat actuel.** Recherche Agronomique Suisse 16: 396–401.
- Fuhrer J, Tendall D, Klein T, Lehmann N, Holzkämper A (2013) **Water demand in Swiss Agriculture – Sustainable Adaptive Options for Land and Water Management to Mitigate Impacts of Climate Change.** Série ART Schriftenreihe 19: 56.
- Hirschi M, Stoeckli S, Dubrovsky M, Spirig C, Calanca P, Rotach MW, Fischer AM, Duffy B, Samietz J (2012) **Downscaling climate change scenarios for apple pest and disease modeling in Switzerland.** Earth System Dynamics 3: 33–47.
- Holzkämper A, Fossati D, Hiltbrunner J, Fuhrer J (2014) **Spatial and temporal trends in agroclimatic limitations to production potentials for grain maize and winter wheat in Switzerland.** Regional Environmental Change 15: 109–122.
- Holzkämper A, Fuhrer J, Frei C (2013) **Temperaturtrends und Rebbau in der Schweiz.** Schweizer Zeitschrift für Obst- und Weinbau 149: 6–9.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 7 «Food security and food production systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kapphan I, Calanca P, Holzkämper A (2012) **Climate change, weather insurance design and hedging effectiveness.** The Geneva Papers 37: 286–317.
- Köplin N, Schädler B, Vivioli D, Weingartner R (2012) **Relating climate change signals and physiographic catchment properties to clustered hydrological response types.** Hydrology and Earth System Sciences 16: 2267–2283.
- Lanz K, Fuhrer J, Haeberli W, Stamm C (2014) **Steigender Nutzungsdruck im Wasserschloss.** Aqua & Gas 11: 24–29.
- Lehmann N, Briner S, Finger R (2013) **The impact of climate and price risks on agricultural land use and crop management decisions.** Land Use Policy 35: 119–130.
- Lobell DB, Schlenker W, Costa-Roberts J (2011) **Climate trends and global crop production since 1980.** Science 333: 616–620.
- Nelson GC, Valin H, Sands RD, Havlík P, Ahammad H, Deryng D, Elliott J, Fujimori S, Hasegawa T, Heyhoe E, Kyle P, Lampe von M, Lotze-Campen, Mason d'Croz, van Meijl H, van der Mensbrugge D, Müller C, Popp A, Robertson R, Robinson S, Schmid E, Schmitz C, Taboada A, Willenbockel D (2014) **Climate change effects on agriculture: economic responses to biophysical shocks.** PNAS 111: 3274–3279.
- Ray DK, Gerber JS, MacDonald GK, West PC (2015) **Climate variation explains a third of global crop yield variability.** Nature Communications 6: 5989.
- Rosenzweig C, Elliott J, Deryng D, Ruane AC, Müller C, Arneth A, Boote KJ, Folberth C, Glotter M, Khabarov N, Neumann K, Piontek F, Pugh TAM, Schmid E, Stehfest E, Yang H, Jones JW (2014) **Assessing agricultural risks of climate change in the 21st century in a global gridded crop model intercomparison.** PNAS 111: 3268–3273.
- Springmann M, Mason-D'Croz D, Robinson S, Garnett T, Godfray HCJ, Douglas G, Rayner M, Ballon P, Scarborough P (2016) **Global and regional health effects of future food production under climate change: a modelling study.** The Lancet 387: 1937–1946.
- Suisse Grêle (2016) **Produits: La GA+.** [www.hagel.ch/fr/produkte/ga/](http://www.hagel.ch/fr/produkte/ga/)
- WHO (2014) **Quantitative risk assessment of the effects of climate change on selected causes of death, 2030s and 2050s.** Geneva: World Health Organization, 128 pp.
- Willenbockel D (2012) **Extreme weather events and crop price spikes in a changing climate.** Oxfam Research Reports, September 2012.

## 2.11 Tourisme

**Le changement climatique entraîne aujourd’hui déjà une détérioration des conditions d’enneigement hivernales. Une évolution qui affecte aussi le tourisme en Suisse, et particulièrement les domaines de sports d’hiver situés à moins de 2000 mètres d’altitude. L’accroissement potentiel des dangers naturels et les modifications du paysage augmentent la vulnérabilité du tourisme suisse et sont susceptibles d’occasionner des coûts élevés, directs et indirects, en cas de sinistre. Des opportunités se profilent cependant aussi pour le tourisme suisse, notamment avec l’allongement de la saison estivale du printemps à l’automne. Globalement, en Suisse, le tourisme devra s’adapter dans différents domaines et régions; il y aura notamment une demande pour de nouvelles offres ou des extensions des offres existantes, indépendantes de l’enneigement. La première priorité réside toutefois dans les mesures d’adaptation nécessaires pour réduire les risques de dommages liés aux catastrophes naturelles.**

*Martine Rebetez (Université de Neuchâtel et WSL), Therese Lehmann Friedli (Université de Berne)*

### La situation dans le monde et en Suisse

Au niveau mondial, le tourisme côtier, le tourisme rural/ alpin et le tourisme du ski sont les plus concernés par les changements climatiques. En hiver, on observe déjà une détérioration des **conditions d’enneigement** aux altitudes les plus basses, à l’échelle de tout l’hémisphère nord : au Canada, en Scandinavie et dans l’espace alpin européen, Suisse comprise (IPCC 2014/WGII). Dans l’espace alpin les plus pénalisés sont en particulier les domaines de sports d’hiver situés à moins de 2000 mètres d’altitude.

Si l’on veut maintenir une sécurité d’enneigement<sup>1</sup> dans ces régions, des sommes élevées doivent être investies dans l’enneigement artificiel, lequel induit à son tour une importante consommation de ressources (énergie, eau).

En été, l’augmentation des températures dans les régions septentrionales et en altitude, par exemple dans les Alpes suisses, peuvent avoir des effets positifs pour le tourisme. En Suisse, des saisons estivales plus longues, dès avril et mai, mais surtout jusqu’en septembre et octobre, augmentent l’attractivité des régions de plaine au bord des lacs et des régions alpines (IPCC 2014/WGII; Perch-Nielsen et al. 2010; Serquet & Rebetez 2011). Les périodes estivales sans précipitations peuvent en outre avoir un impact positif sur les activités de tourisme outdoor en altitude.

Dans les régions touristiques méridionales, en revanche, l’augmentation des périodes de canicule et de sécheresse en été pourrait entraîner un recul de la demande ou un report des flux touristiques vers les mois d’automne. C’est particulièrement le cas pour les régions côtières, par exemple dans l’espace méditerranéen.

### Vulnérabilité

#### Des changements progressifs

Partout dans le monde, le climat évolue progressivement et à long terme plaçant le secteur touristique devant des défis qui sont cependant régulièrement repoussés au second plan pour faire face à d’autres urgences. Les petits établissements et les entreprises touristiques perçoivent le changement climatique comme une menace moins urgente que les autres risques économiques auxquels ils sont exposés (IPCC 2014/WGII/Chap.9). Lorsque, par exemple, les touristes de la zone euro renoncent à venir en Suisse en raison du franc fort, cela constitue une menace directe et immédiate pour la survie de nombreux établissements et activités touristiques, et les mesures de renforcement de la compétitivité sont alors prioritaires.

#### Le tourisme hivernal sous pression

La vulnérabilité du tourisme suisse face au changement climatique concerne principalement les régions et les saisons où les activités touristiques sont tributaires de l’enneigement. Les hivers deviennent plus doux, ce qui conduit à une diminution de la sécurité d’enneigement naturel, surtout dans les régions de moyenne altitude, ainsi qu’en début et en fin de saison, et ce indépendamment de l’évolution des précipitations hivernales. (cf. chap. 1.6 La température, p. 40, chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46) (CH2014-Impacts 2014; Serquet et al. 2013; Klein et al. 2016). Pour pouvoir s’assurer de bonnes conditions d’enneigement, les amateurs de sport d’hiver risquent à l’avenir de préférer de plus en plus, soit les sorties à la journée, plutôt que des vacances de ski réservées à l’avance, soit des domaines skiables de plus haute altitude. Pour un tourisme du ski déjà en régression, le recul du tourisme d’hébergement, à forte valeur ajoutée, représente une pression supplémentaire pour les professionnels du secteur (Lehmann 2013).

<sup>1</sup> Couche de neige de 30 centimètres pendant 100 jours, au moins sept années sur dix

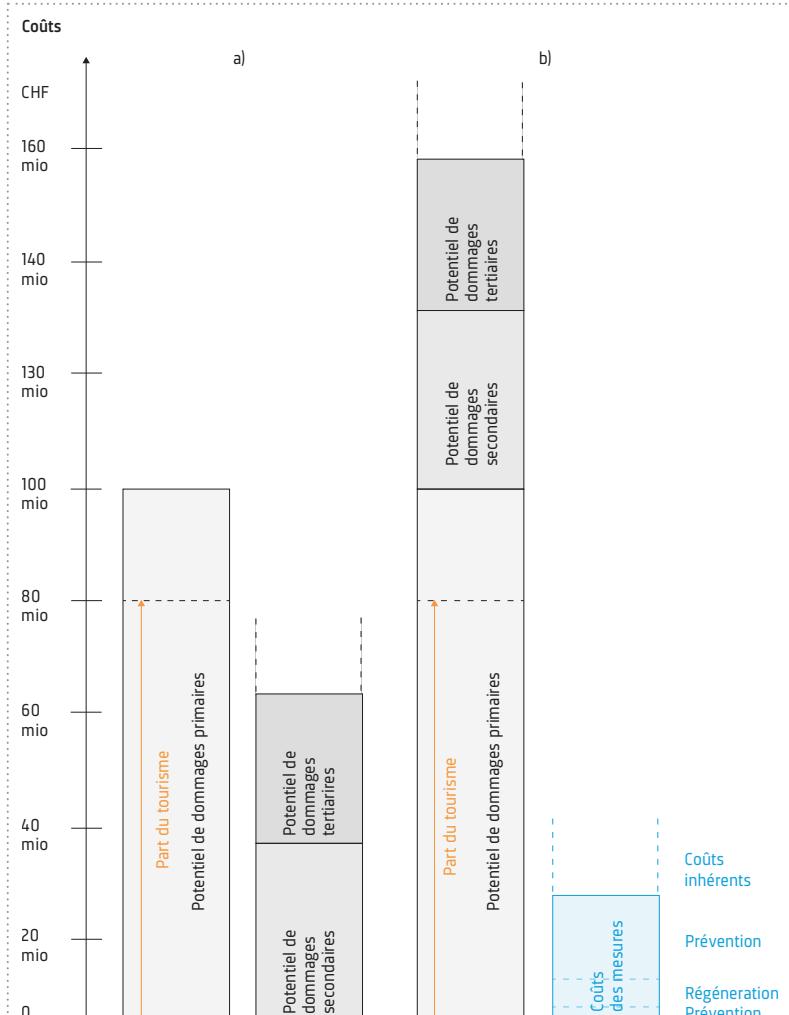


Figure 2.17: Analyse coûts-bénéfices de la construction de la galerie de vidange du lac glaciaire de Grindelwald. a) Comparaison entre le potentiel (primaire) de dommages directs, tels que les dommages aux bâtiments et infrastructures, et le potentiel de dommages indirect, tels que les faillites d'entreprises (potentiel de dommages secondaires) ou les coûts d'image (potentiel de dommages tertiaires) b) Comparaison entre le potentiel de dommages total et les coûts de mesures d'adaptation (construction de la galerie de vidange et autres mesures, telles que la mise en place de systèmes d'alerte ou l'élaboration de concepts d'évacuation). Les coûts potentiels des dommages dépassent de très loin ceux des mesures d'adaptation. (Source: Lehmann & Schaub 2013)

aux domaines skiables autrichiens. Ces avantages impliquent cependant un recours massif à l'enneigement artificiel en novembre et en décembre (Steiger & Abegg 2013). Or le nombre de jours pendant lesquels la production de neige de culture est possible devrait diminuer en raison de l'augmentation des températures (CH2014 2014).

#### Les modifications du paysage et l'accroissement du risque de catastrophes naturelles augmentent la vulnérabilité

La vulnérabilité du tourisme augmente d'une part en raison des changements de paysage induits par le recul des glaciers, et d'autre part en raison de l'augmentation des risques de dangers naturels liés à la fonte des glaciers et du pergélisol. Le secteur du tourisme doit prendre en compte le fait que ces conséquences des changements climatiques – même s'ils varient beaucoup d'une région à l'autre – entraîneront des modifications de l'attractivité et du potentiel d'activités touristiques.

En effet particulièrement, le paysage est l'un des éléments les plus importants de l'offre touristique. Il est difficile d'estimer dans quelle mesure les changements climatiques modifieront cette attractivité du paysage. La formation de nouveaux lacs glaciaires pourrait par exemple avoir un impact positif sur le paysage ; en revanche, la présence de grands champs d'éboulis, résultant de chutes de grands pans de rochers ou du recul des glaciers, peut avoir un impact négatif. (Haeberli et al. 2013; Lehmann 2013). Avec la disparition d'un glacier, c'est aussi un élément de marketing essentiel qui disparaît, affectant l'intérêt pour la destination touristique concernée. Il faut toutefois souligner le fait que les interventions humaines directes sur certains paysages jouent un rôle plus important que le changement climatique.

Aujourd'hui déjà, l'enneigement incertain au mois de décembre constitue un défi pour les régions où l'on pratique le ski, puisqu'une part considérable du chiffre d'affaires annuel y est générée entre Noël et Nouvel An (Serquet et al. 2013). Une étude menée pour le canton des Grisons montre pour l'année 2035, sur la base du scénario SRES-A2 (scénario sans mesures spécifiques de réduction des gaz à effet de serre), que 70 pour cent des domaines skiables n'auront plus d'enneigement naturel garanti à Noël (CH2014 2014). Avec leurs nombreux domaines skiables de haute altitude, les Grisons ou le Valais disposent cependant d'avantages comparatifs par rapport

En cas de catastrophe naturelle, les coûts indirects liés à la perte d'attractivité ou à un dégât d'image, pourront s'avérer particulièrement élevés à long terme dès lors que les touristes ne viendraient plus parce qu'ils considèreraient que la destination serait devenue dangereuse à la suite d'un tel événement (fig.2.17 ; coûts tertiaires). Une analyse coûts-bénéfices du cas du lac formé au-dessus de Grindelwald, en aval du glacier, le confirme : sans intervention préventive, la rupture du lac glaciaire aurait entraîné, en

plus des coûts directs des dommages aux infrastructures et aux bâtiments, des coûts indirects plus de deux fois supérieurs, liés à des dégâts d'image et à des faillites d'entreprises. De manière générale, la part imputable au changement climatique dans le coût total des dommages causés par une catastrophe naturelle est cependant difficile à déterminer (Haeberli et al. 2013; Lehmann 2013).

#### **Le partage des ressources en eau**

La question de l'approvisionnement en eau, et surtout celle du juste partage des ressources en eau, va prendre de plus en plus d'importance, particulièrement au-delà de 2050, lorsque l'eau issue jusque là de la fonte des glaciers viendra à manquer en été. Les lacs de retenue, jusqu'à présent réservés aux sociétés hydroélectriques pour leurs seuls besoins, devront de plus en plus souvent être mis à la disposition d'autres utilisateurs. Dans le secteur du tourisme, les besoins en eau pourraient augmenter du fait de la production de neige artificielle (Weingartner et al. 2014).

#### **Allongement de la saison estivale**

Si la variabilité des températures ne va pas changer, les conditions estivales interviendront de plus en plus tôt au printemps et se prolongeront de plus en plus tard en automne. Cela ouvre des possibilités d'extension de l'offre touristique estivale et de mieux rentabiliser l'entre-saison, moins fréquentée par les touristes. Les groupes cibles potentiels à cette période sont particulièrement les voyageurs plus âgés, dont le nombre augmente, ainsi que les groupes de touristes non européens.

#### **Conditions extrêmes**

La hausse générale des températures en été amènera des périodes de canicule plus fréquentes en Suisse (CH2014-Impacts 2014) (cf. chap. 1.6 La température, p. 40, chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52). Entre juin et août, les températures caniculaires en plaine, et spécialement dans les régions méridionales telles que le Tessin ou l'espace méditerranéen, peut déjà inciter les touristes à se rendre dans les régions de montagne pour trouver une fraîcheur plus agréables. Les chiffres des nuitées d'hôtels, en hausse dans les stations de montagne durant ces épisodes, indiquent que ces régions pourraient en tirer profit (Serquet & Rebetez 2011).

Les événements de précipitations intenses, ajoutés à l'élévation de l'altitude de la neige, à la fonte des glaciers et au dégel du pergélisol, augmenteront le risque de dangers naturels (inondations, coulées de boue ou glissements de terrain). Pour le tourisme alpin, cela peut entraîner une augmentation des dommages aux infrastructures, des

faillites d'entreprises, voire une perte d'image (Lehmann 2013).

#### **Adaptation**

Certains aspects du changement climatiques, pour autant qu'ils soient mis à profit et valorisés dans le développement touristique d'une région, pourront profiter au tourisme alpin. Les mesures prises dans le développement de l'offre, dans la réduction des risques naturels et dans la communication seront déterminantes afin de réduire les incidences négatives des changements (Müller & Lehmann 2010). Le développement de l'offre touristique pourra inclure davantage d'événements indépendants des conditions climatiques. Il s'agira également de promouvoir les techniques les plus durables possibles en matière d'enneigement artificiel. Dans le domaine de la communication, la mise en place de sentiers didactiques sur le climat et les changements climatiques, ou des excursions guidées, offrent la possibilité de montrer les impacts des changements climatiques et de sensibiliser les touristes. En matière d'adaptation, la première priorité revient cependant aux mesures prises pour la réduction des dangers, comme le montre l'analyse coûts-bénéfices de la gestion du lac glaciaire de Grindelwald citée plus haut (fig. 2.17).

La majorité des mesures d'adaptation déjà mises en œuvre dans le secteur du tourisme l'ont été à l'initiative et avec le financement d'acteurs privés. A l'avenir les pouvoirs publics devront aussi apporter des contributions financières là où des mesures importantes deviennent nécessaires en matière de planification, d'organisation et de construction. Il s'agira par exemple, à titre préventif, de développer les zones de protection, d'élaborer de nouveaux scénarios de dangers naturels pour les régions, de promouvoir la formation et la recherche sur les processus d'adaptation, de constituer et de coordonner des instances pour l'échange d'expériences ou l'élaboration de concepts d'intervention. Cela nécessitera une évaluation des mesures d'adaptation possibles selon des critères tels que le bénéfice additionnel, la priorisation, la faisabilité, l'efficacité, l'acceptation et l'efficacité des coûts (IPCC 2014/WGII; Lehmann 2013).

#### **Les défis pour la Suisse**

Le tourisme suisse devra s'adapter aux changements climatiques, particulièrement dans certains domaines et dans certaines régions. Le tourisme d'hiver en moyenne montagne est particulièrement concerné, dans la mesure où il sera affecté par un manque de neige de plus en plus fréquent pendant la période à forte valeur ajoutée des fêtes de fin d'année. Cela nécessitera surtout de proposer

des offres nouvelles et élargies qui ne dépendent pas de l'enneigement. En été, les régions de plaine connaîtront davantage de périodes de canicule. La fraîcheur confortable dans les régions alpines et l'atmosphère méditerranéenne des bords des lacs de plaine rendront ces régions plus attractives du point de vue touristique, ce qu'elles pourront exploiter commercialement en proposant des offres adéquates. Comme dans d'autres secteurs, les mesures de réduction des dangers doivent être la première priorité pour le secteur du tourisme, car les coûts potentiels des dommages, par exemple en cas de rupture d'un lac glaciaire, peuvent dépasser de très loin les coûts des mesures d'adaptation. Cela s'explique par le fait que, dans le tourisme, en cas d'événement causant des dommages, les faillites d'entreprises et les dégâts en matière d'image pèsent très lourdement, en plus des coûts directs liés aux bâtiments et aux infrastructures.

## Bibliographie

- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Haeberli W, Bütlér M, Huggel C, Müller HR, Schleiss A (eds.) (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken. Formation de nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques**. Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61). [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 9 «Rural Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Klein G, Vitasse Y, Rixen C, Marty M, Rebetez M (2016) **Shorter snow cover duration since 1970 in the Swiss Alps due to earlier snowmelt more than to later snow onset**. Climatic Change (in press).
- Lehmann Friedli T (2013) **Ökonomische Relevanz von Klimaanpassung im Tourismus – Qualitative und quantitative Kosten-Nutzen-Bewertungen von Anpassungsmassnahmen im Schweizer Alpenraum**. Berner Studien zu Freizeit und Tourismus 58, Berne.
- Lehmann Friedli T, Schaub Y (2013) **Neue Gletscherseen im Alpenraum – Schaden- und Nutzenpotential für den Schweizer Tourismus**. In: Bieger T, Beritelli P, Laesser C (2012) Nachhaltigkeit im alpinen Tourismus, Schweizer Jahrbuch für Tourismus 2012: 111–126.
- Müller HR, Lehmann Friedli T (2010) **Le tourisme suisse face aux changements climatiques: conséquences et options possibles (Résumé)**. SECO, Berne.
- Perch-Nielsen S, Amelung B, Knutti R (2010) **Future climate resources for tourism in Europe based on the daily Tourism Climatic Index**. Climatic Change 103: 363–381.
- Serquet G, Marty C, Rebetez M (2013) **Monthly trends and the corresponding altitudinal shift in the snowfall/precipitation day ratio**. Theoretical and Applied Climatology 114: 437–444.
- Serquet G, Rebetez M (2011) **Relationship between tourism demand in the Swiss Alps and hot summer air temperature associated with climate change**. Climatic Change 108: 291–300.
- Steiger R, Abegg B (2013) **The Sensitivity of Austrian Ski Areas to Climate Change**. Tourism Planning & Development 10: 480–493.
- Weingartner R, Schädler B, Reynard E, Bonriposi, Graefe O, Herweg K, Homewood C, Huss M, Kauzlaric M, Liniger H, Rey E, Rist S, Schneider F (2014) **MontanAqua: Gestion de l'eau en temps de pénurie et de changement global**. Programme national de recherche «Gestion durable de l'eau» (PNR 61). [www.nfp61.ch](http://www.nfp61.ch)

## 2.12 Bâtiments et infrastructures

**Les cycles d'investissement des infrastructures techniques, tels les bâtiments, les routes et les systèmes d'approvisionnement énergétique, courent généralement sur plusieurs décennies. Les infrastructures sociales, comme les hôpitaux, la police ou l'armée, ne sont guère mieux loties, au regard du temps que demande la moindre réorganisation de ces services. Si les changements climatiques appellent des adaptations, ils réduisent aussi la sécurité de la planification. Les effets directs du changement climatique pour la Suisse, s'agissant des bâtiments et infrastructures, devraient rester relativement circonscrits. En effet, comparativement à ceux d'autres pays, les bâtiments et infrastructures suisses sont très bien armés pour faire face aux éventuels changements climatiques. Ils pourraient même, à certains égards, avoir tout à gagner d'un changement climatique modéré. Plus que des effets directs, ce sont probablement les répercussions indirectes des changements climatiques qui nous affecteront le plus. La Suisse est inextricablement liée au tissu économique mondial, dont de nombreuses régions seront exposées à des changements sociétaux et économiques majeurs. Ces changements pourraient nuire considérablement à la rentabilité des investissements réalisés, tant en Suisse que dans le reste monde, et affecter ainsi les bâtiments et infrastructures bien plus durement que les conséquences directes du réchauffement planétaire.**

Christoph Ritz (ProClim/SCNAT), Mark Zimmermann (EMPA)

### Situation mondiale

Dans la littérature spécialisée, des températures annuelles moyennes de l'ordre de 13 degrés Celsius sont considérées comme optimales pour le développement économique (cf. Burke et al. 2015). Elles pourraient aussi se révéler avantageuses pour les bâtiments, ainsi que pour de nombreuses infrastructures, car elles n'engendrent que des contraintes physiques modérées et ne nécessitent ni chauffage ni refroidissement intensifs pour garantir confort et hautes performances économiques (p.ex. Wyon 2000). La plupart des actuelles nations industrialisées se situent dans des zones au climat favorable dont la température annuelle moyenne est inférieure, ou à peine supérieure, à ces 13 degrés Celsius. Les bâtiments et infrastructures des nations industrialisées répondent généralement à des normes de sécurité relativement élevées et sont de bonne qualité. Comme le montre la figure 2.18, l'économie des nations industrialisées du nord pourrait même être épargnée, selon le scénario sans mesures explicites de protection du climat (en bref: le scénario de référence) RCP8,5. Ce sera toutefois moins le cas des pays du sud de l'Europe, de l'Australie et dans certaines régions des Etats-Unis ainsi que de la Chine.

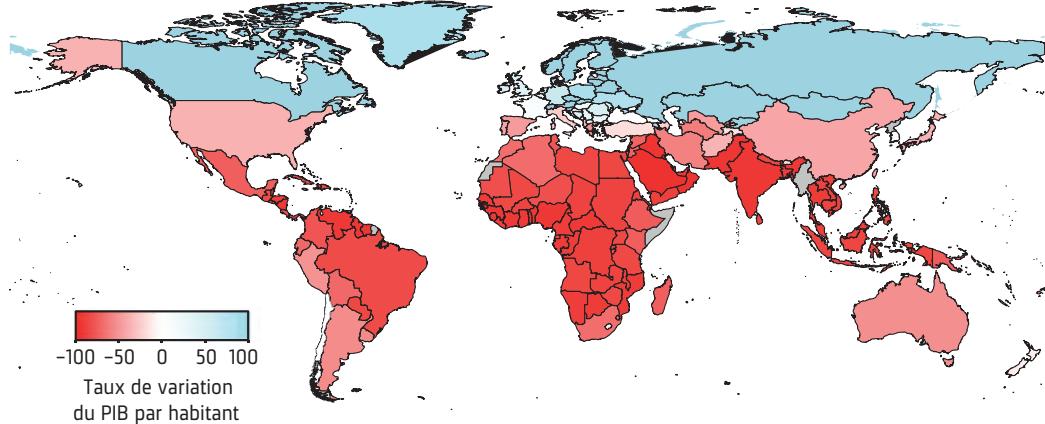
De nombreuses régions tropicales et subtropicales affichent des températures annuelles moyennes nettement supérieures à 13 degrés Celsius. Nombre de ces régions sont aujourd'hui déjà trop peu préparées aux fluctuations naturelles et aux phénomènes météorologiques extrêmes. Il est à prévoir que les changements climatiques ne menacent pas les seuls bâtiments et infrastructures de ces pays en développement et pays émergents. En effet, compte tenu de la baisse attendue de leurs performances

économiques (fig. 2.18), leur capacité d'adaptation et de prévention se trouvera elle aussi amoindrie. Les priorités doivent être axées sur les conséquences des inondations et tempêtes, auxquelles les bâtiments ne résistent souvent pas. La chaleur et la sécheresse croissantes sont elles aussi une source de graves problèmes.

### Situation nationale

Sur le Plateau suisse, la température annuelle moyenne est d'environ 9,5 degrés Celsius. La Suisse peut donc, comme la plupart des zones tempérées du nord, tirer avantage d'un léger réchauffement de son climat (fig. 2.18). Un climat plus doux réduit en effet les besoins énergétiques liés au chauffage, ainsi que les dégâts liés au gel et à la neige. A l'inverse, les systèmes de climatisation tournent plus en été. Mais leur utilisation n'augmente de manière significative qu'en cas de fort réchauffement. Un risque accru de dommages immobiliers, du fait du vent et de la multiplication des pluies battantes (fortes pluies associées à des vents élevés), est imaginable, mais rien ne permet encore de conclure avec certitude que cela sera le cas. Les crues et les laves torrentielles pourraient être le problème le plus critique et provoquer de graves dégâts, du moins localement.

Les *infrastructures techniques* suisses, comme les bâtiments, les infrastructures de production énergétique et de transport, le réseau routier ou les systèmes de communication sont – en comparaison avec la situation qui prévaut dans la plupart des régions du monde – tout à fait parées pour faire face aux *conséquences directes* du climat actuel. A cela s'ajoutent des systèmes d'observation



**Figure 2.18:** Projection de l'évolution du PIB en 2100 pour le scénario RCP8,5, en comparaison avec une évolution sous le climat actuel. La plupart des pays industrialisés, avec leurs bâtiments et infrastructures, se trouvent en zones tempérées, avec des températures annuelles moyennes proches des 13 degrés Celsius idéaux. Leur PIB pourrait donc ne connaître qu'un impact relativement restreint. Les conséquences négatives prévisibles pour le PIB de la plupart des pays en développement pourraient en revanche considérablement compliquer l'adaptation des bâtiments et infrastructures. (Source: Marshall et al. 2015)

bien développés, permettant de repérer à temps les dangers naturels sérieux et de prendre les mesures qui s'imposent.<sup>1</sup> Autant de raisons pour lesquelles la Suisse n'a, ces dernières décennies, enregistré que peu de décès liés à des phénomènes météorologiques extrêmes, à l'exception de la canicule de 2003, qui a coûté prématurément la vie à un millier de personnes. A l'avenir, les infrastructures techniques devraient encore être largement à la hauteur des défis climatiques ou pourront y être adaptées. Il n'en reste pas moins que les crues de 2005 ont provoqué des dégâts matériels à hauteur de 3 milliards de francs.

La question qui se pose est de savoir si les *infrastructures sociales* suisses sont elles aussi prêtes à affronter les événements climatiques futurs. Le système de soins de santé, avec les hôpitaux et les services de secours, ou les services de sécurité, comme la police, l'armée ou la protection civile, n'ont jusqu'ici pas encore vraiment eu l'occasion de faire leurs preuves dans des situations de catastrophes. L'été chaud de 2015 a néanmoins montré que des leçons avaient été tirées de la canicule de 2003, notamment avec des adaptations du système sanitaire. Cela a très vraisemblablement permis de réduire notre vulnérabilité.

Tous les bâtiments et infrastructures de Suisse nécessitent néanmoins des adaptations, pour diverses raisons socioéconomiques. Ces besoins sont à tout le moins encore renforcés par les conséquences des changements climatiques.

- Avec l'urbanisation toujours plus dense, l'étalement urbain toujours plus grand et la mobilité croissante, l'*exposition* de l'homme, des bâtiments et des infrastructures aux forces de la nature ne cesse d'augmenter, avec à la clé un risque accru de sinistres. Ainsi, le risque de dommages corporels est supérieur lorsque les trains se multiplient et sont bondés, même si la fréquence du phénomène naturel *mise en danger* reste identique. Et le risque se fait encore plus présent dès lors que des changements climatiques rendent ces événements plus fréquents.

- La société est de moins en moins encline à accepter le risque – surtout lorsqu'il a des causes externes. L'acceptation du risque est d'autant moins grande lorsqu'il concerne des événements très rares susceptibles d'avoir des répercussions catastrophiques (Sunstein 2003). Quelques bâtiments se trouvent aujourd'hui déjà dans des zones menacées où, compte tenu de l'état actuel des connaissances et de notre acceptation du risque, il ne devrait désormais plus être possible de construire. Une multiplication des événements, et un renforcement de leur intensité, suite aux changements climatiques peut, localement, conduire à un élargissement des zones à risque, de sorte que d'autres bâtiments et infrastructures existants se retrouveront dans ces zones.

<sup>1</sup> Par exemple en mesurant régulièrement les versants montagneux autour des lacs artificiels ou grâce à des stations de mesure fixes chargées de surveiller les glissements de terrain ou les éboulements sur les routes de montagne menacées.

| Régions urbaines en Suisse                  |   |                                |
|---|---|--------------------------------|
| Infrastructure                              | Besoins d'adaptation et perspectives  | Facteurs influençant le climat |
| Approvisionnement en eau fraîche            | L'approvisionnement en eau est assuré dans la plupart des villes suisses. Les périodes prolongées de canicule requièrent des corrections du réseau d'approvisionnement (p. ex. des groupements plus importants), des mesures de réduction de la consommation et une gestion intégrée de l'énergie hydraulique, de l'irrigation et de l'eau potable.   |                                |
| Système d'évacuation des eaux usées         | La plupart du temps, les eaux usées polluées des ménages, de l'industrie et des routes très fréquentées ne sont pas séparées des eaux usées non polluées (p. ex. provenant des toits). La croissance démographique et les gros pics de précipitations engendrent une surcharge des systèmes et un écoulement direct dans les cours d'eau. Lors du renouvellement des systèmes obsolètes, le redimensionnement et la séparation permettent une optimisation des coûts.                   |                                |
| Approvisionnement en énergie                | L'approvisionnement en énergie des zones urbaines et industrielles est fortement affecté par les longues périodes de canicule ou de froid. Cela vaut en particulier si les 40 pourcent d'électricité produits par les centrales nucléaires n'ont pas été remplacés par des énergies renouvelables et si la consommation continue à augmenter en dépit des mesures d'amélioration de l'efficacité. La production locale (p. ex. photovoltaïque) permet de réduire les pénuries en été.   |                                |
| Approvisionnement en denrées alimentaires   | L'approvisionnement en denrées alimentaires des agglomérations suisses est mondialisé et donc fortement influencé par les prix mondiaux et par la productivité agricole locale et nationale. L'adaptation de l'approvisionnement en denrées alimentaires constitue un défi de taille. Il est nécessaire d'apporter des changements radicaux dans la production, le stockage, la transformation et le transport des denrées alimentaires et de réduire les déchets.                      |                                |
| Transport et communication                  | Les agglomérations suisses et, en particulier, les grandes régions urbaines disposent de réseaux denses de transports publics et de communication. Certes, ces réseaux sont vulnérables, mais en cas d'événements climatiques extrêmes, ils restent disponibles grâce à la redondance de leurs structures. Les régions de montagnes sont les plus vulnérables, car toutes les voies de transport et infrastructures de communication sont proches les unes des autres dans les vallées. |                                |
| Habitat                                     | Les agglomérations sont composées d'un grand nombre de vieux bâtiments (souvent protégés) qui sont mal isolés en été et en hiver. Qui plus est, certaines constructions se trouvent dans des zones inondables. Si de gros efforts de réduction de la consommation de l'énergie de chauffage ont déjà été faits, on accorde encore trop peu d'attention à l'accumulation de chaleur dans les bâtiments en raison de la protection solaire insuffisante.                                  |                                |
| Système de santé                            | La surveillance de la santé et des soins par le système de santé suisse intervient de manière réactive. Pendant les périodes de canicules prolongées, les personnes âgées, les malades chroniques et les très jeunes ont besoin d'une aide ciblée.  |                                |
| Principaux secteurs économiques et services | L'économie suisse est dominée par le secteur des services et par des entreprises opérant à l'international qui sont dépendantes des risques climatiques des marchés externes. Les interruptions des infrastructures essentielles, comme les réseaux de transport et d'énergie, ont des répercussions à court terme.   |                                |

Légende des facteurs influençant le climat

|               |                       |                |                         |                     |            |      |
|---------------|-----------------------|----------------|-------------------------|---------------------|------------|------|
|               |                       |                |                         |                     |            |      |
| Réchauffement | Températures extrêmes | Précipitations | Précipitations extrêmes | Couverture neigeuse | Sécheresse | Crue |

Figure 2.19: Risques climatiques pour les infrastructures dans les villes et agglomérations suisses. Sont représentés ici les risques clés et leurs causes climatiques. (Source: IPCC 2014/WGII/Chap.8, élaboré sur la base du tableau 8-6 Londres et du tableau générique 8-3, contenu adapté à la Suisse)

## Changements progressifs, situations extrêmes et adaptation

Généralement, les *infrastructures techniques* présentent des cycles d'investissement de plusieurs décennies. Pour éviter des pertes de valeurs imprévues, les changements climatiques attendus sur l'ensemble du cycle d'investissement doivent être pris en compte lors de la construction ou de la transformation.

Les infrastructures des *zones densément peuplées* – villes et leurs agglomérations – où se concentrent 80 pour cent des emplois (Conseil fédéral 2015) et où les événements extrêmes frappent plus de monde, méritent une attention toute particulière. Le rapport du groupe de travail II du GIEC a analysé séparément l'impact des changements climatiques sur ces zones urbaines. La figure 2.19 répertorie les principaux types de risques pour la Suisse, ainsi que leurs causes climatiques.

Le système d'évacuation des eaux usées par exemple (deuxième risque clé du tableau) est particulièrement menacé par les risques climatiques, du fait des fortes précipitations et des inondations. Aujourd'hui, les risques sont encore limités dans la plupart des endroits. Ils peuvent toutefois déjà être moyennement élevés aux endroits vulnérables (eaux usées des stations d'épuration susceptibles de se déverser dans les cours d'eau en cas de fortes précipitations).

En Suisse, les *zones rurales* sont, à quelques exceptions près, très proches des zones urbaines. Elles hébergent des personnes qui travaillent en ville et accueillent les citadins désireux de se ressourcer. Les villes dépendent en outre des zones rurales et de leurs ressources, telles l'eau potable, les denrées alimentaires et l'énergie. Des événements extrêmes dans les zones rurales pourraient ainsi également mettre à mal l'approvisionnement des zones urbaines.

Les infrastructures de certaines zones rurales, et plus particulièrement des régions montagneuses, sont exposées à d'autres risques d'infrastructures : en cas de blocage des routes, elles se retrouvent souvent coupées du monde. La sécurité de l'approvisionnement de régions entières – quoique faiblement peuplées – peut ainsi être mise en péril. Les axes routiers qui traversent les Alpes sont également sensibles à d'autres risques. Souvent, la vallée abrite, sur un espace restreint, non seulement des communications ferroviaires et des routes, mais aussi des gazoducs et oléoducs, ou encore des lignes à haute tension. Un seul événement extrême peut ainsi provoquer une rupture de l'approvisionnement, susceptible de toucher l'économie et la population bien au-delà de la vallée.

## Les défis pour la Suisse

Il est possible de minimiser les investissements futurs, potentiellement élevés, rendus nécessaires par la nouvelle donne climatique et sortant du cadre de l'assainissement normal des bâtiments et infrastructures, en tenant compte des changements climatiques prévisibles sur l'ensemble du cycle de vie des bâtiments dès leur construction. La condition étant de disposer de projections fiables permettant d'établir des cartes des dangers et d'appliquer systématiquement les connaissances ainsi acquises au travers de lois et de règles concrètes et vérifiables et/ou avec des aides financières (p.ex. par l'entremise d'un fonds public). Le cycle de vie des bâtiments et infrastructures s'étalant souvent sur bien plus de 50 ans, les stratégies d'adaptation constituent un défi à deux égards :

- Les adaptations aujourd'hui nécessaires dans le cadre d'une construction ou d'une rénovation dépendent du succès des mesures de protection climatique adoptées à l'échelle mondiale : les adaptations à mettre en place en présence d'un réchauffement de deux degrés Celsius ne sont pas les mêmes que celles associées à un réchauffement de quatre degrés Celsius.
- Or, pour limiter l'élévation des températures à 2 degrés Celsius, il faut sortir du carbone. Un monde globalement neutre en CO<sub>2</sub> pose d'autres défis en termes de bâtiments et d'infrastructures (p.ex. grandes expansions du réseau routier ou des aéroports) qu'un monde essentiellement fondé sur les énergies fossiles.

Il est donc important que les efforts d'adaptation prennent également en compte l'impact qu'auront les mesures nationales et internationales prises pour atténuer le changement climatique, des mesures qui, selon la politique climatique adoptée, seront susceptibles d'engendrer de grands changements économiques et sociaux. Compte tenu de son étroite intégration au réseau mondial, la Suisse est fortement exposée aux conséquences de tels changements. Cela restreint donc la sécurité de la planification lors de la construction ou de l'entretien des infrastructures. Vous trouverez ci-après quelques exemples supplémentaires :

- Si les prix de l'énergie étaient appelés à changer (p.ex. au travers de taxes) ou si la demande énergétique évoluait (p.ex. grâce à une plus grande efficacité énergétique ou à un meilleur pilotage de la demande), les investissements consentis aujourd'hui dans le secteur de l'énergie pourraient a posteriori se révéler non rentables, et des emplois pourraient être perdus dans des secteurs importants. Aujourd'hui déjà, des investissements massifs doivent être consentis dans la transfor-

mation du réseau électrique.<sup>2</sup> Le degré d'expansion requis est toutefois grandement tributaire du développement, voire de la promotion, des différentes sources d'énergie et de l'évolution technique de la demande locale (stockage local, SmartGrids etc.).

- L'évolution des besoins en matière de mobilité et de tourisme peut rendre nécessaires de nouveaux investissements et, dans le même temps, en remettre d'autres en question. Le secteur touristique se montre lui aussi très sensible aux changements qui se font jour dans l'environnement économique. Il est à prévoir que le tourisme suisse soit amené à se réorienter du fait des changements climatiques et doive ainsi consentir d'importants investissements d'infrastructures – investissements dont la rentabilité reste encore très incertaine eu égard au caractère imprévisible de l'évolution du contexte socioéconomique national et international (cf. chap. 2.11 Tourisme, p. 117).

La tâche la plus difficile pourrait résider dans l'adaptation des infrastructures sociales. La croissance de la consommation et de la production que suppose notre système économique s'oppose à leur restriction devenue nécessaire si l'on entend endiguer les changements climatiques. Et cette situation nuit à la sécurité de la planification, compte tenu de la gigantesque palette des évolutions sociétales et économiques possibles. Le risque que des investissements se révèlent désastreux augmente donc en conséquence.

## De nouvelles études sont nécessaires

Nous avons besoin d'analyses systémiques approfondies pour comprendre dans toute leur complexité les tenants et aboutissants entre mise à disposition de l'énergie et utilisation de celle-ci, exploitation différenciée des bâtiments et infrastructures et dépendance de ceux-ci aux coûts, réglementation des marchés et débouchés commerciaux. Outre les risques techniques, les évolutions économiques et sociétales futures devront également être davantage prises en compte dans les décisions. Il nous faudra pour cela disposer d'informations plus détaillées que les seules modifications saisonnières du tableau des températures et des précipitations, ou la fréquence et la durée des événements intenses (menace), pour pouvoir évaluer les risques pour les infrastructures et les possibilités de les adapter. D'autres paramètres, comme l'exposition, la vulnérabilité et la capacité d'adaptation des infrastructures, seront

aussi décisifs. Pour évaluer la vulnérabilité et choisir les mesures d'adaptation ad hoc, des projections de séries chronologiques de paramètres climatiques, par jour voire par heure, seront nécessaires. Et il faudra les mettre en corrélation avec d'autres paramètres de risques, comme le système énergétique, les transports ou encore les changements sociaux et économiques.

## Bibliographie

- Burke M, Hsiang SM, Miguel E (2015) *Global non-linear effect of temperature on economic production*. Nature 527: 235–239.
- Conseil fédéral (2015) *Politique des agglomérations 2016+ de la Confédération. Pour un développement cohérent du territoire suisse*. Rapport du 18 février 2015, Berne.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Chapter 8 «Urban Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Chapter 9 «Rural Areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Sunstein CR (2003) *Terrorism and Probability Neglect*. The Journal of Risk and Uncertainty 26: 121–136.
- Wyon DP (2000) *Enhancing Productivity While Reducing Energy Use in Buildings*. Proceedings of the conference «E-Vision 2000», Department of Energy, Washington DC: 11–13.

<sup>2</sup> D'après les estimations de Swissgrid, quelque 10 à 16 milliards de francs sont nécessaires pour le réseau de transport et de distribution. Certains de ces investissements relèvent des mesures de modernisation normales. Selon les centrales électriques bernoises, l'équipement du réseau local en instruments de mesure, de pilotage et de régulation pour gérer l'arrivée du courant local pourrait plus que doubler les besoins en investissements par rapport à la situation actuelle, pour être à même de distribuer dans l'espace et dans le temps les énergies renouvelables produites de manière décentralisée par les installations photovoltaïques et éoliennes.

## 2.13 L'espace urbain

L'évolution du climat modifie notre cadre de vie. Les principaux risques climatiques auxquels l'espace urbain est exposé dans le monde sont, suivant la situation géographique, les vagues de chaleur, la montée du niveau de la mer, les crues sur les côtes et le long des rivières, les épisodes de précipitations extrêmes, la sécheresse, les glissements de terrain, la pollution de l'air et la pénurie d'eau. Les personnes, les activités économiques ainsi que les écosystèmes dépourvus d'infrastructures ou de services de prévention et de protection, comme les systèmes d'alarme par exemple, sont particulièrement vulnérables. En Suisse, les nuisances de la chaleur dans les agglomérations et les villes ont été identifiées comme un défi majeur en matière d'adaptation au changement climatique. A ceci s'ajoute que l'espace urbain, du fait de sa haute densité de population et de sa forte concentration de valeurs, est particulièrement vulnérable face à une augmentation d'événements extrêmes due au climat. De fait, l'aménagement du territoire est d'une grande importance pour permettre une meilleure adaptation aux conséquences du changement climatique.

*Marco Pütz (WSL)*

### La situation mondiale et nationale

L'évolution du climat modifie notre cadre de vie. En raison du changement climatique, l'espace urbain, les villes et les agglomérations, où la plupart des activités humaines se concentrent et où le milieu bâti continue de se développer, est exposé dans le monde entier notamment aux risques suivants (IPCC 2014/WGII/SPM) :

- l'augmentation des nuisances dues aux fortes chaleurs,
- la montée du niveau de la mer,
- les crues sur les côtes et le long des cours d'eau,
- les épisodes de précipitations extrêmes,
- la sécheresse,
- les glissements de terrain,
- la pollution de l'air et
- la pénurie d'eau.

Les personnes, les activités économiques et les écosystèmes qui ne disposent pas d'infrastructures et de services de prévention et de protection, tels que des digues contre les crues ou des systèmes d'alarme, sont particulièrement vulnérables. En outre, les villes et les régions les plus menacées sont celles situées dans des zones très exposées aux risques naturels, par exemple sur les côtes et le long de cours d'eau.

En Suisse aussi, la vie dans l'espace urbain sera de plus en plus marquée par des événements extrêmes. Des phénomènes tels que les précipitations extrêmes (cf. chap. 1.7 Le cycle hydrologique, p. 46, chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52) surviennent plus fréquemment et sont une menace grandissante pour les infrastructures et l'habitat urbain. L'« accentuation des fortes chaleurs dans les agglomérations et les villes », que la stratégie suisse d'adaptation au climat a identifiée comme l'un des plus grands défis en matière d'adaptation au changement climatique, concerne avant tout les secteurs du dévelop-

pement territorial, de la santé et de l'énergie dans l'espace urbain (OFEV 2012).

### Vulnérabilité : l'effet d'îlot de chaleur renforce les impacts

L'espace urbain est concerné à double titre par le changement climatique. D'une part, l'effet de hautes températures peut être renforcé par des spécificités de la ville. C'est ainsi qu'une circulation de l'air réduite, le manque de zones ombragées et de surfaces vertes, l'absorption du rayonnement solaire par les murs et les sols, de même que les rejets thermiques d'installations industrielles, de bâtiments et des transports contribuent à l'effet d'îlot de chaleur, un réchauffement prononcé pendant la journée et un refroidissement réduit pendant la nuit. Aujourd'hui déjà, la différence de température entre la ville et la campagne peut atteindre jusqu'à une dizaine de degrés.

D'autre part, du fait de sa haute densité de population et de sa forte concentration de valeurs, l'espace urbain est particulièrement vulnérable face à une augmentation d'événements extrêmes dus au climat. Aux conséquences directes du climat, par exemple les dommages causés à des personnes ou à des biens par des événements relevant des dangers naturels, s'ajoutent des effets indirects du changement climatique qui peuvent également avoir un fort impact sur l'espace urbain : des infrastructures importantes, dites « critiques », peuvent être mises hors d'état de fonctionner, ce qui cause des problèmes dans les transports, les télécommunications ou l'approvisionnement en eau potable et en énergie (cf. chap. 2.12 Bâtiments et infrastructures, p. 121).

## Projets de villes, communes et régions suisses sur l'adaptation au climat

En Suisse, différents projets axés sur la pratique portent sur les défis du changement climatique pour les villes, les communes et les régions et sur de possibles stratégies d'adaptation:

### Projets de la Confédération

Dans son programme pilote « Adaptation au changement climatique » (2014-2016), la Confédération soutient des projets d'adaptation au climat dans les cantons, les régions et les villes. Trois projets pilotes sont consacrés à un ensemble de sujets touchant au développement urbain adapté au climat. Dans son projet pilote « ACCLIMATASION », la ville de Sion travaille sur des terrains publics et privés à la réduction de l'effet d'îlot de chaleur et du risque de crue, afin de sensibiliser les décisionnaires et la population à la nécessité de s'adapter au climat. Le projet pilote « Urban Green & Climate Bern » développe des concepts, méthodes et mécanismes de financement pour la gestion durable des arbres du peuplement urbain. Il vise à améliorer les connaissances sur la vulnérabilité climatique et les services écosystémiques (par exemple la fonction de puits de carbone) des peuplements urbains. Un autre projet aborde au niveau national le sujet « Effet de la canicule sur la mortalité et possibles mesures d'adaptation ». Les groupes de population particulièrement concernés et les caractéristiques météorologiques significatives en matière de santé sont examinés en prenant pour exemple des cantons du Tessin et de Genève.

### CLISP: les défis pour l'arc alpin

Le projet « CLISP: Climate Change Adaptation by Spatial Planning in the Alpine Space » (2008-2011), coordonné par l'Office fédéral

du développement territorial (ARE), a porté sur les défis concrets que le changement climatique pose à l'aménagement du territoire dans l'arc alpin et a développé des approches pour un développement territorial à l'épreuve des risques climatiques. Il en est ressorti entre autres un manuel pour l'évaluation de la « résistance au changement climatique » d'instruments d'aménagement du territoire (ARE 2013), qui se réfère aux expériences tirées de dix régions modèles de l'arc alpin (Kruse & Pütz 2014).

### Analyses climatiques à Zurich, Genève et Bâle

Ces dernières années, les villes et cantons suisses ont mené différentes études devant leur permettre à l'avenir de mieux intégrer des aspects du climat urbain dans leurs décisions en matière de planification, aménagement et constructions. La ville de Zurich, par exemple, a procédé à une analyse de son climat urbain (2009-2011), ce qui lui a permis d'identifier les nuisances aigües auxquelles elle doit s'attendre, telles que les fortes chaleurs, les entraves à la circulation de l'air et l'augmentation de la pollution atmosphérique. En 2015, elle a présenté une stratégie climatique et élaboré un plan de mesures en vue de réduire ses émissions de gaz à effet de serre et de s'adapter au changement climatique. En 2015 aussi, le canton de Genève a développé un « Plan climat cantonal » et analysé les risques et les chances du changement climatique. Un rapport présenté en 2011 par le canton de Bâle porte sur les conséquences du changement climatique et a servi de base à l'élaboration de mesures pour les différents secteurs concernés et à l'examen des risques et des chances du changement climatique.

## L'adaptation: l'aménagement du territoire joue un rôle important

L'aménagement du territoire est d'une grande importance pour l'adaptation au changement climatique. En effet, de nombreuses conséquences de ce changement ont une incidence spatiale directe et influencent l'utilisation du territoire. Etant donné que l'espace urbain est particulièrement sensible à l'augmentation attendue de vagues de chaleur, les activités d'adaptation visent en général à mettre en valeur les surfaces vertes ou libres et à en créer de nouvelles ainsi qu'à promouvoir leur rôle dans l'aération des zones urbanisées. Il en résulte cependant des conflits potentiels d'intérêts en matière d'aménagement du territoire avec le développement urbain vers l'intérieur et avec la densification des constructions. Des différends au sujet de l'utilisation de l'espace se présentent aussi entre la prévention des dangers naturels et le développement urbain. A défaut d'agir de manière prévoyante, la vulnérabilité des villes, communes et régions augmente-

ra. L'aménagement du territoire dispose d'un grand potentiel pour gérer l'adaptation aux conséquences du changement climatique et améliorer la capacité de résistance aux impacts défavorables. Néanmoins, aménager et planifier le territoire de manière à créer des synergies transsectorielles, à garantir une haute qualité des constructions et à préserver et créer suffisamment d'espaces libres représente un grand défi. C'est le cas notamment pour la Suisse avec ses structures fédérales morcelées et sa forte pression urbanistique présente et future.

## Défis pour la Suisse

Pour beaucoup de villes, communes et régions, le changement climatique se présente comme une question relativement nouvelle et n'est qu'une préoccupation parmi d'autres. Ajouté à la problématique de l'énergie et de la rareté des ressources, un développement et une planification urbains qui ménagent l'énergie et le climat prennent

cependant toujours plus d'importance. Du point de vue de nombreuses villes, les défis concernent avant tout le développement intégré, peu énergivore, du milieu bâti et des surfaces dédiées aux transports, l'approvisionnement énergétique respectueux du climat, ainsi que les assainissements de bâtiments et les nouvelles constructions (cf. ECOPLAN 2012). Néanmoins, peu de communes se préoccupent déjà du changement climatique et de ses conséquences ainsi que de la protection contre les dangers naturels motivée par l'évolution du climat. Et quand elles le font, c'est souvent de manière indirecte, par exemple par l'établissement de cartes des dangers.

Dans la mesure où des stratégies concrètes et des mesures d'adaptation au niveau local et régional ne sont développées encore que rarement et le plus souvent à titre d'activités pilotes (cf. encadré Projets de villes, communes et régions suisses sur l'adaptation au climat, p. 127), l'échange d'expérience entre villes ou agglomérations joue un grand rôle, de même que la collaboration entre communes, cantons et Confédération. Dans le plan d'action de la stratégie suisse d'adaptation au climat (OFEV 2014), le champ d'action du développement territorial prévoit entre autres mesures la participation au «Programme pilote adaptation aux changements climatiques» et l'amélioration des bases de décision des aménagistes, par exemple par des outils de travail (ARE 2013). De nombreuses villes s'occupent depuis des années de mesures visant à améliorer la qualité de vie, à mettre en valeur les espaces libres et à développer les infrastructures vertes et ont ainsi une grande expérience et beaucoup d'expertise en matière d'adaptation. Toutefois, ces activités n'ont pas toujours été menées en relation directe avec le changement climatique. Depuis les étés caniculaires de 2003 et 2015, la sensibilisation croissante aux changements climatiques s'est néanmoins renforcée dans les villes. Au cas où le changement climatique serait inscrit dans la loi sur l'aménagement du territoire comme défi relevant de la politique d'organisation du territoire, les villes et les régions devraient s'engager plus fortement dans des activités relatives à l'évolution du climat. La Confédération pourrait aussi mieux soutenir et coordonner ces dernières. Reste à savoir dans quelle mesure ceci est politiquement réalisable actuellement d'une part et soutenu par les milieux responsables de l'aménagement du territoire d'autre part.

## Bibliographie

- ARE (2013) *Changement climatique et développement territorial. Un outil de travail pour aménagistes*. Berne.
- ECOPLAN (2012) *Les défis urbains, du point de vue de la Confédération. Contribution au débat sur la suite de la politique des agglomérations*. Sur mandat de l'Office fédéral du développement territorial (ARE) et du Secrétariat d'Etat à l'économie (SECO), Berne.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kruse S, Pütz M (2014) *Adaptive Capacities of Spatial Planning in the Context of Climate Change in the European Alps*. European Planning Studies 22: 2620–2638.
- OFEV (2012) *Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d'action*. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2014) *Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Plan d'action 2014–2019*. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)

## 2.14 Conséquences des changements climatiques sur le système énergétique suisse

**Des études internationales et nationales mettent en évidence les tendances qualitatives des conséquences des changements climatiques sur le système énergétique suisse: les effets attendus seront nettement inférieurs aux changements d'ordre démographique, économique et technique, du moins à court (2030) et à moyen (2050) terme. Les répercussions positives et négatives s'équilibreront tant au niveau de la demande que de l'offre; il est même probable que les effets bénéfiques seront légèrement supérieurs. Les études relèvent néanmoins des risques au niveau des infrastructures énergétiques. Des incertitudes notables subsistent encore à long terme (seconde moitié du XXI<sup>e</sup> siècle).**

*Konstantinos Boulouchos (EPF de Zurich)*

### Demande et utilisation de l'énergie

#### Refroidissement et chauffage

Le réchauffement direct de 1,5 à 4 degrés Celsius qui est attendu en Suisse (en moyenne aussi bien annuelle que sur le plan régional) réduira les besoins en chauffage de 7 à 20 pour cent durant la seconde moitié du siècle (vers 2085), en supposant des standards constants en matière de technique des bâtiments. Il y aurait en conséquence une hausse des besoins en électricité pour la climatisation. Les deux effets sont relativement faibles et s'équilibreraient probablement jusqu'à un certain point sur le plan énergétique. Cependant, la réduction des besoins en chaleur va contribuer directement à faire baisser les émissions de CO<sub>2</sub>, alors que l'augmentation des besoins en refroidissement devrait avoir un effet moindre en raison du mix électrique suisse – à faibles émissions de CO<sub>2</sub> – attendu pour 2050 (CH2014-Impacts 2014). Globalement toutefois, l'effet direct du changement climatique sur les émissions de CO<sub>2</sub> devrait jouer un rôle clairement secondaire, si on le compare aux défis à relever principalement dans le domaine des transports, mais aussi aux évolutions techniques à venir dans le domaine de la construction. En fonction des scénarios, l'on s'attend à des économies de CO<sub>2</sub> de 0,9 à 3,7 pour cent au maximum. Cependant, si la mise en œuvre de la stratégie énergétique 2050 (OFEN & Prognos 2012) est réussie et, de ce fait, permet une nette amélioration de l'efficacité énergétique des bâtiments, les économies réalisées au niveau des besoins en chaleur grâce aux changements climatiques seraient nettement moins élevées. Des systèmes de refroidissement plus efficaces seront par contre nécessaires à l'avenir, en particulier dans le secteur tertiaire, étant donné que les quantités de chaleur rejetée seront vraisemblablement plus élevées en raison du recours massif aux systèmes informatiques.

Le déplacement de la demande en électricité de l'hiver vers l'été aura un aspect positif, à savoir une meilleure répartition de la demande entre ces deux saisons. Cet

équilibre ira dans le sens de la future structure d'offres du système électrique suisse. En effet, on escompte une part plus élevée d'installations photovoltaïques, ce qui permettra d'augmenter la production d'électricité notamment en été.

#### Transports

Dans le secteur des transports, l'on prévoit comme effet direct des changements climatiques non seulement des charges accrues au niveau de la climatisation des véhicules, mais surtout une hausse du trafic à partir des grandes agglomérations: d'une part, en direction des destinations de sports d'hiver à des altitudes toujours plus élevées (pour autant que les sports d'hiver survivent aux changements climatiques à long terme; cf. chap. 2.11 Touisme, S. 117), d'autre part, vers les régions situées hors des villes en été (OcCC & ProClim 2007). L'accroissement du trafic occasionnera une hausse de la consommation de carburant. L'ampleur de cette augmentation de la demande énergétique devra être observée dans le temps. Elle est difficile à quantifier et a moins de poids que les autres facteurs (aménagement du territoire, croissance démographique, évolution économique).

#### Offre énergétique

Les changements climatiques auront différentes répercussions au niveau de l'offre énergétique – en particulier en ce qui concerne la production d'électricité. Il convient de noter que la Suisse sera aussi fortement touchée par l'évolution de l'offre européenne en matière d'énergie. Celle-ci sera probablement même plus importante que l'influence des changements climatiques eux-mêmes.

## Force hydraulique

Des études récentes (CH2014-Impacts 2014) prédisent jusqu'en 2050 environ des minimes augmentations – de l'ordre de 0,9 à 1,9 pour cent en moyenne annuelle – pour la contribution de loin la plus importante à la production d'électricité, à savoir celle provenant de la force hydraulique. Il faut néanmoins s'attendre à des variations régionales. L'on s'attend cependant à une hausse d'environ dix pour cent de la production de courant en hiver, et au recul simultané de quatre à six pour cent de cette même production en été, notamment en raison des quantités d'eau diversement disponibles selon la saison. L'avantage est que ce décalage saisonnier réduirait les excédents de production durant le semestre d'été, qui devraient augmenter à l'avenir en raison de la contribution importante escomptée du photovoltaïque. Il n'y a toutefois pas encore d'affirmations solides pour l'après 2050, période où l'on redoute une réduction du volume des glaciers d'environ 60 à 80 pour cent (CH2014-Impacts 2014, scénario avec des émissions moyennes SRES-A1B). Des changements au niveau du charriage pourraient en outre poser de plus grandes exigences infrastructurelles. Les possibilités techniques pour procéder à des adaptations dans le domaine sont connues, mais nécessitent des moyens financiers en conséquence.

## Grandes centrales thermiques

Des températures plus élevées provoquent généralement une perte de performance et, dans une moindre mesure, une baisse de rendement des grandes centrales thermiques, en particulier lorsqu'il y a moins d'eau de refroidissement à la fin de l'été. Cependant, comme l'on peut s'attendre à ce que les centrales nucléaires soient mises à l'arrêt en Suisse bien avant 2050 et que les centrales à charbon n'entreront pas en ligne de compte, ce problème devrait être insignifiant à long terme. S'il fallait à l'avenir recourir à des centrales à gaz pour couvrir les besoins énergétiques intérieurs, elles devraient être utilisées de préférence durant l'hiver, saison durant laquelle la question du refroidissement peut être résolue plus facilement.

## Photovoltaïque

Les hausses de température attendues pourraient jouer un rôle central pour la technique photovoltaïque, dont le potentiel pour couvrir les besoins en électricité en Suisse est estimé à 20 pour cent vers le milieu du siècle. Une hausse de température d'un degré conduit généralement à une baisse de rendement d'environ 0,5 pour cent (IPCC 2014/WGII/Chap.10), en fonction de la technique photovoltaïque utilisée. En valeur absolue, l'effet n'est pas très grand, d'autant plus que des techniques telles que les

capteurs hybrides avec un refroidissement par l'arrière des panneaux solaires et une utilisation simultanée de la chaleur, par exemple pour chauffer l'eau, arrivent sur le marché. Toutefois, des événements extrêmes, comme des chutes de grêle, pourraient concerter la Suisse, ce qui nécessiterait de protéger en conséquence les infrastructures concernées.

## Biomasse

Même s'il existe des différences régionales (production plus importante en haute altitude grâce au changement climatique, et moindre à basse altitude en raison de la sécheresse estivale), il faut compter sur une disponibilité accrue de la biomasse suite aux changements climatiques. Le potentiel d'utilisation de cette énergie, acceptable aujourd'hui du point de vue écologique, représente entre 10 et 15 pour cent au maximum de l'énergie finale actuelle en Suisse (OcCC & ProClim 2007). L'utilisation de la biomasse est un aspect essentiel de la stratégie énergétique 2050. Il faut toutefois veiller à l'utilisation optimale des différents types de biomasse, car cette énergie chimique précieuse ne doit pas servir uniquement à couvrir les besoins en chaleur, mais aussi à assurer une production combinée d'électricité et de chaleur et/ou à remplacer les carburants fossiles, par exemple sous forme de méthane synthétique.

## Vent

Selon la stratégie énergétique 2050, l'énergie éolienne devrait atteindre une contribution annuelle de quelque quatre térawattheures pour couvrir les besoins en électricité en Suisse. Les estimations quantitatives relatives à l'influence des changements climatiques ne sont pas connues à l'heure actuelle. La fréquence estimée des événements extrêmes donne à penser que les charges pour garantir la robustesse et le bon fonctionnement des installations augmenteront; cela vaut aussi pour les infrastructures hydrauliques et, de manière générale, dans le domaine des transports et de l'énergie.

## Conclusion

Les répercussions attendues des changements climatiques sur le système énergétique suisse seront très modérées au moins jusqu'au milieu du siècle, et probablement majoritairement positives d'après les tendances. Des défis plus importants ont été mis en évidence, d'une part, concernant les exigences infrastructurelles et, d'autre part, en relation avec la contribution à long terme de la force hydraulique.

## Bibliographie

- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)**. Chapter 10 «Key economic sectors and services». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- OcCC, ProClim (eds.) (2007) **Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Conséquences pour l'environnement, la société et l'économie**. Berne, 168 pp.
- OFEN, Prognos (2012) **Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energieanfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000–2050. Perspectives énergétiques 2050**.
- OFEN (2014) **Statistique globale suisse de l'énergie 2014**. [www.bfe.admin.ch](http://www.bfe.admin.ch)
- OFEV (2012) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d'action**. Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2014) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Plan d'action 2014–2019**. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2015) **Inventaire des émissions de gaz à effet de serre 2015**. [www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre](http://www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre)

## 2.15 Santé

**Les conséquences directes et indirectes des changements climatiques sur la santé ne sont plus à démontrer. Elles toucheront tout particulièrement les pays et les populations les plus pauvres. En Suisse, il est possible, au travers de stratégies d'adaptation, de réduire considérablement l'impact des conséquences sanitaires, à savoir des vagues de chaleur et phénomènes climatiques extrêmes. Dans l'ensemble, en Suisse, l'impact des changements climatiques sur la santé pourrait moins dépendre du climat et de ses conséquences directes et indirectes que des décisions politiques adoptées en matière de protection du climat et des stratégies d'adaptation. L'adaptation à des vagues de chaleur plus fréquentes et plus intenses, la surveillance des vecteurs de maladies et des maladies infectieuses chez l'homme et l'animal, ainsi qu'une politique énergétique compatible avec une bonne qualité de l'air devraient être les piliers de toute stratégie de prévention.**

*Nino Künzli (Institut tropical et de santé publique suisse et Université de Bâle)*

### Situation mondiale et nationale

Les changements climatiques peuvent avoir des répercussions directes et indirectes sur la santé. Fluctuations des températures, précipitations extrêmes, vagues de chaleur ou feux de forêts sont des causes directes de maladies et de décès. L'impact des pertes de récolte, de la redistribution des vecteurs de maladies<sup>1</sup>, de l'assainissement de l'eau, de la pénurie d'eau ou des migrations provoquées par la sécheresse (réfugiés) sur la santé sera quant à lui indirect (IPCC 2014/WGII/Chap.11). Les influences peuvent être positives ou négatives : le déplacement géographique de la production alimentaire, la baisse des maladies vectorielles ou la diminution des vagues de froid auront un effet bénéfique sur la santé dans certaines régions. Mais dans l'ensemble, ces conséquences positives seront bien moindres que les conséquences négatives. Ainsi, la distribution géographique de certains vecteurs de maladies, et donc des maladies qu'ils transmettent, continuera d'évoluer – d'une part à cause des changements climatiques et d'autre part, surtout, à cause des flux migratoires et commerciaux mondiaux. Dans les pays grands consommateurs de viande, le passage à une alimentation moins carnée peut contribuer à réduire les polluants susceptibles d'avoir une influence sur la santé et le climat. S'agissant de la santé en Suisse, les changements climatiques jouent un rôle relativement mineur en comparaison avec d'autres problématiques sanitaires, comme l'augmentation des maladies non transmissibles et les coûts qui en découlent. D'ici 2050, ils ne feront qu'accentuer les défis sanitaires déjà existants, tels que la gestion des vagues de chaleur ou la propagation des maladies transmissibles. A plus long terme, ces effets d'amplification devraient néanmoins gagner en importance.

### Vulnérabilité

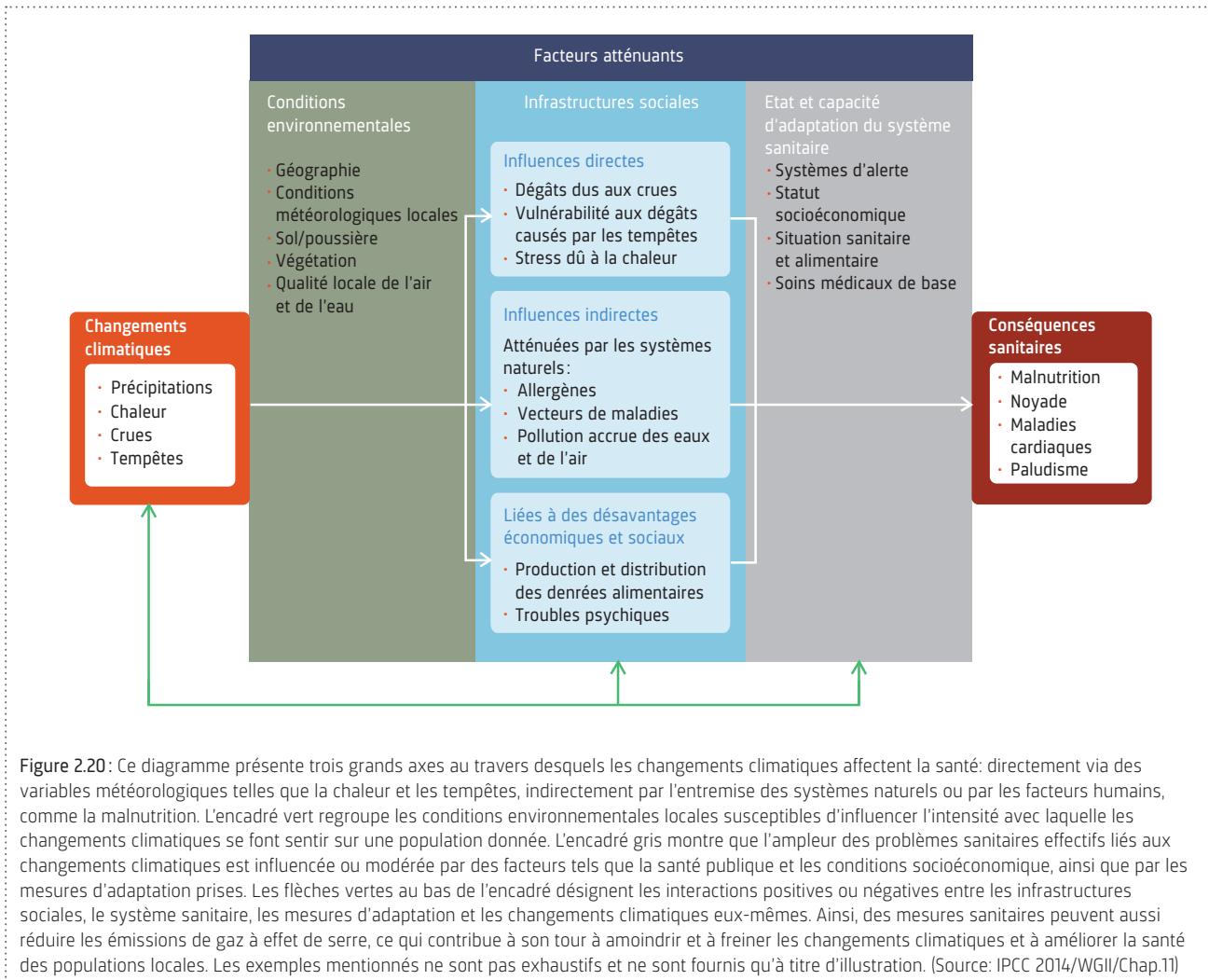
La vulnérabilité de la population aux conséquences sanitaires directes et indirectes des changements climatiques dépend de la situation géographique, de la formation et des revenus, ou encore de l'âge et de l'état santé des personnes, mais aussi de la capacité des gouvernements à répondre efficacement aux défis (IPCC 2014/WGII/Chap.11). Les systèmes de santé les plus durement touchés par les changements climatiques seront ceux des pays les plus pauvres et des régions côtières exposées à un risque majeur d'inondation. Les conséquences climatiques susceptibles d'avoir un impact sur la santé, comme les vagues de chaleur, frapperont surtout les plus jeunes et les plus âgés, de même que les personnes socialement isolées et celles déjà en proie à des problèmes de santé, tels que des troubles rénaux, des maladies psychiques ou de l'asthme allergique.

Suite à l'amélioration généralisée de la santé, l'espérance de vie a fortement augmenté dans pratiquement tous les pays. La part des seniors et des personnes souffrant de maladies chroniques non transmissibles ne cesse dès lors de s'accroître. Et, avec elle, celle de la population qui pourrait être particulièrement affectée par des situations climatiques extrêmes.

Jusqu'au milieu du siècle, si les changements climatiques continuent de progresser, il faudra s'attendre à un risque sanitaire plus élevé surtout dans les pays pauvres, et ce, du fait des vagues de chaleur, de la sécheresse, des inondations et des incendies, de la malnutrition découlant d'une production alimentaire moindre ainsi que de l'augmentation des maladies liées à la contamination de l'eau et des denrées alimentaires ainsi que des maladies vectorielles (IPCC 2014/WGII/Chap.11).

Avec le changement climatique, on pourrait assister à une augmentation de la concentration en ozone atmosphérique

<sup>1</sup> Les «vecteurs de maladies» transmettent des agents infectieux d'un hôte à un autre organisme sans tomber eux-même malades. La transmission peut s'effectuer par une piqûre, par exemple.



et à un allongement de la saison des pollens, au détriment surtout des personnes asthmatiques ou allergiques.

## Maladies transmissibles

En Suisse, l'augmentation annoncée des vagues de chaleurs (CH2014 2014), la modification des vecteurs de maladies et l'éventuel allongement de la saison des pollens pourraient avoir un impact en termes de santé publique. S'agissant des vecteurs de maladie, le rôle des changements climatiques doit néanmoins être mis en corrélation avec d'autres facteurs de causalité importants. Ainsi, l'intensification, dans le cadre de la globalisation, des flux migratoires et commerciaux internationaux entraîne un déplacement des vecteurs et agents pathogènes, comme le montre l'exemple du moustique tigre (*Aedes albopictus*), devenu endémique dans le Tessin et désormais aussi dans le nord de la Suisse (Kutlar 2010; Suter et al. 2015). L'exemple du paludisme, également présent dans les cli-

mats plus tempérés comme celui de la Suisse jusqu'à la première moitié du XIX<sup>e</sup> siècle (Kutlar 2010), montre que les stratégies sanitaires axées par exemple sur la lutte contre les sources de contamination ou les vecteurs infectés (dans le cas du paludisme, via l'assèchement des zones marécageuses) peuvent avoir un impact bien plus grand sur la santé que les changements climatiques. A l'avenir aussi, les décisions politiques et le comportement des personnes devraient, en Suisse, continuer d'exercer une influence plus importante sur les maladies vectorielles que le climat. De façon générale, le bon état sanitaire et les ressources d'adaptation, dont la Suisse ne manque pas, pourraient réduire notre vulnérabilité dans le domaine sanitaire.

## Phénomènes extrêmes

L'augmentation des phénomènes extrêmes, comme les vagues de chaleur ou les fortes précipitations, aura globale-

ment des conséquences sur la santé des populations concernées, surtout pour les personnes qui travaillent à l'extérieur (IPCC 2014/WGII/Chap.11). La capacité de travail et la productivité sont amoindries par les conditions climatiques extrêmes. A cela s'ajoute que les cas d'intoxication alimentaire augmentent en cas de vague de chaleur, lorsque les denrées alimentaires ne sont pas conservées de manière adéquate. Les périodes de sécheresse, les feux de forêt ou les fortes pluies et inondations ont des répercussions directes et indirectes sur la santé. Les exemples australiens, californiens et russes montrent que, par vents défavorables, les grands feux de forêt (souvent très éloignés des agglomérations) peuvent engendrer un smog massif et durable dans les grandes villes, au détriment de la santé (IPCC 2014/WGII/TS). En Suisse, l'impact des vagues de chaleur sur le taux de mortalité et sur les hospitalisations est documenté (CH2014 2014; Grize et al. 2005; Manser et al. 2013).

## Adaptation

Dans les régions où le bien-être augmente, l'impact sanitaire des changements climatiques pourra être limité, ou du moins compensé par des progrès sociaux favorables à la santé publique. Les adaptations les plus efficaces, sur le plan de la santé, coïncident avec les grandes politiques sanitaires mondiales sans rapport avec le climat, dont :

- un accès sûr à l'eau potable, les soins médicaux de base et les programmes de vaccination,
- la lutte contre la pauvreté et
- les programmes visant à donner une réponse efficace aux catastrophes naturelles et au maintien d'un environnement sain.

Si les pays pauvres ne peuvent pas suffisamment être partie prenante à ces avancées, les conséquences sanitaires des changements climatiques s'y feront sentir plus durement et ralentiront encore les progrès. Le Suisse ne devrait néanmoins pas être concernée.

## Événements liés à la chaleur

Les observations du passé (Grize et al. 2005), sans prise en compte des adaptations, ne permettent pas d'établir de manière définitive si les principaux facteurs des changements climatiques pertinents pour la santé (vagues de chaleur, précipitations extrêmes) nuiront à la santé de la population suisse, ni dans quelle mesure. Ainsi, après les vagues de chaleur extrêmes de 2003, des mesures de politique sanitaire ont permis de réduire considérablement les conséquences des phénomènes extrêmes ultérieurs en France (Fouillet et al. 2008) et dans le reste de l'Europe (Kovats 2006). Ces dernières années, plusieurs cantons (dont le canton de Vaud) ont élaboré des plans d'action

en vue d'atténuer les conséquences des vagues de chaleur. Parmi les mesures possibles, citons :

- l'adaptation des comportements : éviter les rayons directs du soleil, augmenter la prise de liquides, consommer des repas rafraîchissants, éviter les activités sportives à l'extérieur aux heures les plus chaudes et compenser la perte de sel et d'eau engendrée par ces activités ; veiller à maintenir une température ambiante et une température corporelle la plus fraîche possible,
- les mesures architecturales : bonne isolation et/ou climatiseurs et
- l'aménagement du territoire : verdissement, création de zones ombragées, aération, plans et cours d'eau ouverts (réduire l'effet d'ilot thermique).

Sur le long terme, la physiologie humaine s'adapte à l'augmentation progressive des températures moyennes. Ainsi, une mortalité accrue est observée partout en cas de vagues de chaleur comme de vagues de froid. La température optimale moyenne en journée, c'est-à-dire la température avec le taux de mortalité le plus bas, dépend en revanche de la zone climatique.

## Mobilité et aménagement du territoire

L'aménagement du territoire, avec l'extension et la promotion des systèmes de transport urbain, offre aussi des

### Les polluants qui agissent sur le climat nuisent aussi à la santé

Exception faite du CO<sub>2</sub>, tous les polluants qui agissent sur le climat, comme la suie ou le dioxyde de soufre ont aussi des répercussions directes sur la santé aux concentrations présentes dans l'environnement. Globalement, plus de sept pour cent de tous les décès et maladies de la charge de morbidité mondiale<sup>1</sup> sont imputables à cette pollution atmosphérique. Une réduction de ces émissions contribue donc à protéger le climat mais aussi la santé. Une politique énergétique axée sur une plus grande efficacité énergétique et sur les énergies renouvelables, qui cible aussi une réduction des émissions de polluants nocifs, sert ainsi les intérêts des politiques climatique et sanitaire. En Suisse, une baisse des émissions de particules de 80 pour cent, telle celle préconisée par la Commission fédérale de l'hygiène de l'air, jouerait en faveur de la politique climatique, mais serait aussi bénéfique à la santé, dans l'immédiat et sur le long terme. En effet, chaque année en Suisse, plusieurs milliers de décès, de même qu'un nombre considérable de maladies, sont imputables aux polluants émis lors de la combustion (ECOPLAN 2014).

<sup>1</sup> La charge de morbidité inclut toutes les années de vie perdues en raison d'un décès prématuré ou dont la qualité est restreinte par la maladie. Ces années de vie perdues ou limitées ont différentes causes www.healthdata.org

possibilités d'adaptation et d'atténuation. Ces systèmes de transport favorisent en effet la mobilité active, réduisent le transport individuel motorisé et conduisent ainsi à une plus grande activité physique et à des émissions polluantes moindres. De même, un aménagement du territoire et une urbanisation adaptés aux changements climatiques peuvent contribuer à la protection du climat et avoir un effet favorable sur la santé, par exemple grâce à des espaces verts plus nombreux, à la prévention des îlots thermiques et à une densification plutôt qu'à un étalement des villes (cf. chap. 2.13 L'espace urbain, p. 126).

## Défis pour la Suisse

Dans les analyses des risques réalisées par les autorités (OFEV, OFPP), la multiplication des vagues de chaleur a été identifiée comme un risque majeur pour la Suisse. En revanche, aucune évaluation complète n'a à ce jour été réalisée à l'échelle nationale concernant l'importance sanitaire des changements climatiques et de la politique climatique, tenant compte notamment de la charge et de la dynamique de la morbidité. De telles études existent néanmoins pour certaines régions (AG, BS). Une évaluation globale doit aussi inclure une comparaison avec les conséquences sanitaires d'autres causes, afin d'isoler adéquatement l'impact sanitaire des changements climatiques de celui d'autres problématiques. En Suisse, par exemple, moins d'un pour cent des hospitalisations pour troubles gastrointestinaux sont imputables aux vagues de chaleur. Une grande partie des maladies infectieuses liées à l'alimentation pourrait toutefois être évitée grâce à des mesures d'hygiène indépendantes du climat. Dans l'ensemble, l'impact, en Suisse, des changements climatiques pourrait moins dépendre de ses conséquences directes et indirectes que des décisions politiques adoptées en matière de protection du climat et des stratégies d'adaptation (OFEV 2014).

Ainsi, en Suisse, la meilleure stratégie tant pour le climat que pour la santé (stratégie gagnant-gagnant) (Cheng & Berry 2013) pourrait ainsi résider dans une politique active dans le domaine de l'énergie et de la lutte contre la pollution de l'air. Les moyens de transport, mais aussi les installations de chauffage au bois, devraient être soumis à des normes des plus strictes en matière d'émissions, si l'on entend éviter que la promotion d'installations de chauffage au bois «climatiquement neutres», pertinente du point de vue de la politique énergétique, ne débouche sur une hausse de la pollution atmosphérique. Pour la Suisse, il y a fort à parier que les bienfaits sanitaires directs d'une politique de lutte contre la pollution de l'air axée sur le climat seront plus grands que les conséquences sanitaires potentielles des changements climatiques (cf. encadré Les polluants qui agissent sur le climat nuisent aussi à la santé).

Outre une politique énergétique respectueuse de la qualité de l'air, les grands piliers d'une politique de prévention qui tienne compte de l'aspect sanitaire résident dans l'adaptation aux vagues de chaleur ainsi que la surveillance des vecteurs et des maladies infectieuses chez l'homme et l'animal. L'essentiel étant d'éviter de prendre des décisions certes propices à la protection du climat, mais défavorables à la santé.

## Bibliographie

- Bless PJ, Schmutz C, Suter K, Jost M, Hattendorf J, Mäusezahl-Feuz M, Mäusezahl D (2014) *A tradition and an epidemic: determinants of the campylobacteriosis winter peak in Switzerland*. European Journal of Epidemiology 29: 527–537.
- Cheng JJ, Berry P (2013) *Health co-benefits and risks of public health adaptation strategies to climate change: a review of current literature*. International Journal of Public Health 58: 305–311.
- CH2014-Impacts (2014) *Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland*. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- ECOPLAN, INFRAS (2014) *Effets externes des transports 2010. Monétarisation des effets sur l'environnement, les accidents et la santé (Résumé)*. Rapport du 18 juin 2014.
- Fouillet A, Rey G, Wagner V, Laaidi K, Empereur-Bissonnet P, Le Tertre A, Frayssinet P, Bessemoulin P, Laurent F, De Crouy-Chanel P, Jouglard E, Hémon D (2008) *Has the impact of heat waves on mortality changed in France since the European heat wave of summer 2003? A study of the 2006 heat wave*. International Journal of Epidemiology 37: 309–317.
- Grize L, Huss A, Thommen O, Schindler C, Braun-Fahrlander C (2005) *Heat wave 2003 and mortality in Switzerland*. Swiss Medical Weekly 135: 200–205.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Chapter 11 «Human health: impacts, adaptation, and co-benefits». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. Technical Summary (TS). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Kovats RS, Kristie LE (2006) *Heatwaves and public health in Europe*. European Journal of Public Health 16: 592–599.
- Kutlar Joss M (2010) *Klimawandel und Gesundheit. Durch Mücken übertragene Infektionskrankheiten in der Schweiz*. Universités de Bâle, de Berne et de Zurich.
- Manser CN, Paul M, Rogler G, Held L, Frei T (2013) *Heat waves, incidence of infectious gastroenteritis, and relapse rates of inflammatory bowel disease: a retrospective controlled observational study*. The American Journal of Gastroenterology 108: 1480–1485.
- OFEV (2014) *Adaptation aux changements climatiques en Suisse - Plan d'action 2014–2019*. Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- Suter T, Flacio E, Farina BF, Engeler L, Tonolla M, Müller P (2015) *First report of the invasive mosquito species Aedes koreicus in the Swiss-Italian border region*. Parasit Vectors 8: 402.
- Xiao J, Peng J, Zhang Y, Liu T, Rutherford S, Lin H, Qian Z, Huang C, Luo Y, Zeng W, Chu C, Ma W (2014) *How much does latitude modify temperature-mortality relationship in 13 eastern US cities?* International Journal of Biometeorology 59: 365–372.

## 2.16 La migration dans le réseau d'interdépendances globales

**La Suisse évolue dans un monde de plus en plus interconnecté. Les conséquences du changement climatique, quand bien même éloignées géographiquement, peuvent donc affecter très concrètement la société suisse, notamment en matière de sécurité et de développement. La migration compte parmi les principaux mécanismes à l'œuvre qui relient la Suisse à ce phénomène d'envergure mondiale.**

*Etienne Piguet (Université de Neuchâtel)*

### Changement climatique, sécurité et développement

Les chapitres 12 (*Human security*) et 13 (*Livelihoods and poverty*) du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGII) analysent de plus près l'impact du changement climatique sur la sécurité et le développement. Le concept de sécurité humaine recouvre les dimensions suivantes :

- les enjeux de sécurité au sens restreint, en particulier les risques de violence et de conflits,
  - les questions de sécurité matérielle, notamment la sécurité alimentaire et
  - toutes les questions de sécurité immatérielle, par exemple menaces pesant sur les conditions de vie d'une population sur le plan de la liberté, de la culture.
- Les recherches sur lesquelles ce rapport est fondé aboutissent à cette conclusion : si la mise en danger de la sécurité humaine n'est certes pas due à une cause unique, le climat compte parmi les facteurs déterminants (IPCC/WGII/Chap.12).

### Sécurité économique

La majorité des études sur la production alimentaire prévoit dès 2050 un déclin des récoltes (cf. chap. 2.10 L'agriculture, p. 111). Il est déjà avéré que le réchauffement affecte les ressources de bases telles que l'eau, les stocks de poissons et l'élevage. Au-delà de certaines limites de concentration de CO<sub>2</sub> (horizon 2100 selon RCP8,5), la combinaison de températures et d'humidité élevées compromettront les activités agricoles et le travail à l'extérieur des habitations dans certaines régions et accroiront de manière très significative les risques pour la sécurité alimentaire (IPCC 2014/WGII/TS)

Les populations pauvres sont particulièrement tributaires des ressources agricoles et exposées à des fluctuations des prix, aussi bien en zones rurales qu'en zones urbaines. On ne peut que souhaiter que les progrès techniques accomplis – nouvelles semences, nouveaux engrains etc. ... – suffisent à compenser ces tendances ; mais même si cet espoir de-

vait se réaliser, ces innovations coûteraient cher et profiteraient donc surtout aux plus riches. Quoique restant difficilement quantifiable, l'intensité accrue de certains aléas climatiques comme les cyclones tropicaux (cf. chap. 1.8 Extrêmes climatiques et météorologiques, p. 52) exercera aussi un impact sur les populations démunies qui sont souvent beaucoup plus vulnérables en raison de leurs habitations de faible qualité, d'une forte densité démographique et du manque d'accès aux soins et aux services de secours (« Vulnérabilité », cf. chap. 2.2 Le nouveau concept de risque du GIEC, S. 77).

La forme la plus radicale de privation d'accès aux ressources est indubitablement la perte de leur espace vital dont sont menacées ces populations. Des centaines de millions de personnes seront exposées à ce risque d'ici la fin du XXI<sup>e</sup> siècle si aucune mesure correctrice n'est prise (IPCC 2014/WGII/TS; IPCC 2014/WGII/Chap.5). Une fois encore, les populations pauvres sont les premières victimes potentielles dans tous les domaines :

- les pays les plus pauvres – dont le Bangladesh (IPCC 2014/WGII/Chap.5) – viennent en tête des pays à protéger,
- les régions menacées sont souvent des villes côtières aux populations défavorisées comme Alexandrie, Port-au-Prince ou Djakarta (IPCC 2014/WGII/Chap.5) et
- à l'intérieur de ces villes, les quartiers les plus exposés aux inondations sont le plus souvent des bidonvilles et des zones d'habitat informel.

Le changement climatique affecte par ailleurs les pratiques culturelles, les modes de vie et l'attachement identitaire des communautés à leur espace de vie (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Il en est tout particulièrement ainsi dans les écosystèmes fragiles et fortement dépendants de l'environnement (p.ex. les peuples Inuits des régions arctiques).

Il ressort de plusieurs études que les dégradations environnementales engendrent inéluctablement des cercles vicieux de conflits et de migrations. Dans les milieux scientifiques, l'existence d'un lien direct entre l'altération de



Figure 2.21: A Saint-Louis du Sénégal le quartier des pêcheurs est menacé par la montée des eaux. (Source: Etienne Piguet)

l'environnement et le développement de ces actes de violence collectifs ou individuels est toutefois sujette à controverses. Le fait que les aléas climatiques puissent exacerber des problèmes politiques et économiques déjà présents et accroître ainsi indirectement les risques de violence est en revanche assez couramment admis (IPCC 2014/WGII/Chap.23). Il apparaît qu'indépendamment de leur origine, l'existence de conflits contribue à accroître la vulnérabilité de ces communautés aux changements climatiques.

### Migration et mouvements de la population

L'historique d'aléas climatiques extrêmes tels qu'inondations et périodes de sécheresse démontre leur capacité à provoquer l'exode de populations entières (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Les constats et modèles actuels suggèrent que les inondations côtières et la diminution du permafrost dans les régions de montagne risquent d'entraîner des migrations et la nécessité de déplacer des populations entières (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Lors de périls climatiques, les migrants prennent en majorité la direction des villes, alors que celles-ci sont souvent elles-mêmes très vulnérables (IPCC 2014/WGII/Chap.12), ce qui a pour effet de rendre les couches de population concernées encore plus vulnérables, et risque de les priver des ressources indispensables pour fuir devant les catastrophes. Il en résulte que les villes les plus exposées, notamment les villes côtières des pays en développement voient leur population s'accroître à un rythme accéléré sous l'effet des migrations.

Malgré la gravité de ces évolutions, la majorité des études consacrées à ce sujet permettent de conclure que la Suisse ne sera pas touchée par des mouvements migratoires ayant pour cause des problèmes environnementaux. En effet, les mouvements de populations liés aux conditions climatiques se limitent généralement à de courtes distances, à l'intérieur des pays concernés et, dans une moindre mesure, jusque dans les pays voisins. On constate en outre lors de catastrophes majeures de courte durée, comme par exemple des cyclones, que les populations déplacées retournent en général sur le lieu de la catastrophe pour y reconstruire leur vie (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Seule une minorité envisage une migration définitive à longue distance.

Les causes des migrations sont multiples et ne se limitent pas aux conflits, à la pauvreté ou aux conditions climatiques, elles sont souvent dictées par des considérations d'ordre économique (réfugiés économiques). On ne peut donc exclure qu'une combinaison de plusieurs facteurs dans des domaines précis puisse aboutir à des crises aigües ou à des difficultés chroniques et générer ainsi une pression migratoire sur la Suisse. Cette hypothèse serait d'autant plus envisageable en cas de présence en Suisse d'une communauté « diasporique » de ressortissants des régions sinistrées. Ce type de migration n'atteindra toutefois jamais l'ampleur des migrations à courte distance.

## Défis pour la Suisse

Il ressort du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC concernant le développement, les conflits et la migration que pour la Suisse, les défis s'avèrent dans une large mesure indirects. Les défis auxquels elle est confrontée résident moins dans sa politique d'asile et d'émigration que dans l'aide sur place en cas de catastrophe, la coopération au développement et la promotion de la paix.

### Politique d'asile

Il n'existe pas actuellement de textes juridiques internationaux protégeant à l'échelle mondiale les personnes déplacées par des aléas environnementaux. La législation suisse ne l'indique pas non plus comme étant un motif justifiant le droit d'asile. De fait, aucun cas d'octroi de l'asile, d'admission ou de protection provisoire pour motifs environnementaux n'a été recensé jusqu'ici. Cette situation ne devrait pas se modifier sensiblement à l'avenir. En revanche, la Suisse pourrait jouer un rôle dans la mise en place de conditions d'accueil améliorées pour les déplacés environnementaux dans les pays limitrophes en poursuivant et en renforçant des efforts tels que l'initiative Nansen où elle joue déjà un rôle de premier plan aux côtés de la Norvège (The Nansen Initiative 2016).

### Politique migratoire

Il faut se faire à l'idée que les populations risquant d'être immobilisées (notamment en raison du manque de ressources économiques) font partie des principales victimes des aléas climatiques. La solution consistant à faciliter leur migration peut donc être une stratégie efficace d'adaptation et de survie (IPCC 2014/WGII/Chap.12). Cette approche pourrait être renforcée dans le cadre des partenariats migratoires et du dialogue international sur la migration (DFAE 2016b).

### Aide en cas de catastrophes et promotion de la paix

Les événements climatiques extrêmes deviennent de plus en plus fréquents et leur violence s'accentue. Le nombre de situations d'urgence augmente. Les mouvements de population subséquents étant généralement temporaires et à courte distance, ils appellent principalement une aide humanitaire d'urgence sur place et des mesures de reconstruction que la Suisse aura l'obligation de soutenir. Au cas où les dégradations environnementales s'aggravaient ou seraient exacerbées par des conflits, la politique

de promotion de la paix devrait jouer également un rôle plus important (DFAE 2016a).

## Coopération au développement

Plusieurs des pays auxquels la coopération suisse au développement donne la priorité sont en première ligne en matière de risques climatiques et de populations à risque. Il est essentiel que les défis liés au changement climatique soient pris d'emblée en compte dans les projets de développement (comme c'est déjà souvent le cas aujourd'hui). L'un des enseignements de la recherche scientifique est que les investissements dans les domaines de la protection et de la prévention des aléas climatiques sont en général bien moins élevés que les coûts sociaux et économiques en cas d'inaction (IPCC 2014/WGII/Chap.5). Même la montée du niveau des mers peut, en raison de la lenteur du processus, être limitée par la mise en place de structures de protection, mais cela nécessite souvent des ressources financières considérables.

Le risque de voir le changement climatique renforcer les disparités socioéconomiques et mettre la sécurité en péril est donc considérable, mais la pluralité des causes à leur origine peut aussi être interprétée comme un signe d'espoir : elle signifie que même si certaines dégradations climatiques sont désormais inévitables, des stratégies bien conçues de prévention, de limitation de leurs impacts et de développement restent de la plus haute actualité.

## Bibliographie

DFAE (2016a) **Politique extérieure. Droits de l'homme et Sécurité humaine. Paix.** [www.eda.admin.ch](http://www.eda.admin.ch)

DFAE (2016b) **Politique extérieure. Droits de l'homme et Sécurité humaine. Migration.** [www.eda.admin.ch](http://www.eda.admin.ch)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 5 «Coastal systems and low-lying areas». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 12 «Human security». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 13 «Livelihoods and poverty». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Chapter 23 «Europe». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Technical Summary (TS). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)

The Nansen Initiative (2016) **The Nansen Initiative – Towards a Protection Agenda for people displaced across borders in the context of disasters and the effects of climate change.** [www.nanseninitiative.org](http://www.nanseninitiative.org)

## 2.17 L'industrie de l'assurance et des services financiers

**Les dommages économiques globaux résultant des extrêmes météorologiques ont augmenté ces dernières années, ceci avant tout en raison de l'accroissement des valeurs matérielles exposées. L'influence du changement climatique est difficile à évaluer dans ce contexte. L'évolution du climat et le développement économique de la propriété privée et des infrastructures publiques feront probablement encore augmenter le potentiel de dommages. Le secteur des assurances doit faire face à de nouveaux défis, tels que des montants de dommages en hausse. Une multiplication des événements soulève la question de leur assurabilité. Pour garantir celle-ci à l'avenir, des mesures de prévention doivent être développées en permanence. Des dispositions telles qu'une hausse des primes, une adaptation de la couverture d'assurance ou une plus large répartition des risques peuvent être nécessaires. En développant de nouveaux modèles de financement, l'industrie des services financiers peut contribuer à ce qu'il y ait suffisamment de capital à disposition pour des mesures d'adaptation. La prise en compte du climat concourt à l'évaluation des risques de placement dans la gestion de patrimoine et permet d'éviter des pertes imprévues.**

*Lea Müller (Swiss Re), Olivia Martius (Université de Berne),  
David N. Bresch (Swiss Re, \*aujourd'hui EPF de Zurich et MétéoSuisse), Sabine Döbeli (Swiss Sustainable Finance)*

La Suisse est habituée à vivre avec des catastrophes naturelles. Les inondations, les tempêtes et la grêle ont causé à maintes reprises des dommages économiques pendant les 60 années passées. D'autres catastrophes naturelles, telles que les vagues de chaleur, les avalanches, les glissements de terrain et les éboulements sont également des menaces pour la population. Des mesures de prévention permettent d'atténuer les risques et des solutions d'assurance peuvent rendre supportables la réparation des dommages. Les effets possibles du changement climatique sur l'assurance des valeurs matérielles (bâtiments, inventaire du ménage etc.) sont examinés ci-après. En revanche, les connaissances de base manquent pour discuter des possibles impacts de l'évolution du climat sur des produits d'assurance ayant trait à la santé, à l'approvisionnement énergétique et au tourisme. Le rôle de l'industrie des services financiers est expliqué dans le dernier paragraphe.

### Trois modes d'action des assurances

Dans le contexte des dangers naturels, le risque exprime l'ampleur et la probabilité d'un dommage possible; il se calcule comme produit de la fréquence d'occurrence par l'ampleur du dommage. Cette dernière dépend de l'intensité de l'événement, de la valeur des objets concernés et de leur vulnérabilité. Les assurances représentent une possibilité de rendre les risques supportables pour les particuliers et pour l'économie. Elles jouent un rôle essentiel dans la maîtrise d'un événement. Les assurances réagissent de trois manières au changement climatique :

- **La stabilisation des moyens d'existence individuels et de l'économie :** L'industrie des assurances identifie et estime les

risques possibles, les évalue financièrement et les couvre. Dans une assurance, un grand nombre de personnes s'associent en une communauté de risque. Elles assument ensemble les risques dus à des événements subits et fortuits et les rendent ainsi supportables. Lors de catastrophes naturelles, les assurances couvrent une partie substantielle de la charge des sinistres : elles soutiennent l'intervention, la remise en état et la reconstruction. Elles s'engagent également en matière de prévention. L'assurance concourt ainsi à la stabilisation des moyens d'existence de particuliers et à celle de l'ensemble de l'économie (IPCC 2014/WGII), ce qui permet aussi d'internaliser les coûts de ces risques.

– **L'encouragement de l'innovation et de la croissance :** L'économie privée peut, elle aussi, recourir à une assurance et atténuer ainsi des risques potentiels liés, par exemple, à de grands projets de construction ou au développement de nouvelles techniques telles que les parcs éoliens et les installations solaires. De cette manière, l'assurance assume une importante fonction d'encouragement de l'innovation et de la croissance (Swiss Re 2010). Elle lance à ce sujet de nouveaux produits (assurance de choses et responsabilité civile pour des nouvelles techniques telles que les parcs éoliens et les installations solaires, assurances indexées sur les conditions météorologiques pour l'agriculture et le tourisme) qui n'aident pas seulement les preneurs d'assurance à faire face au changement climatique, mais qui concourent aussi à la conversion vers une économie respectueuse du climat.

– **L'approvisionnement de l'économie en capitaux à long terme :** L'industrie des assurances gère des montants considérables, dont elle a besoin pour payer des dommages futurs, et compte parmi les grands investisseurs institutionnels. La majeure partie de ce capital est investi à

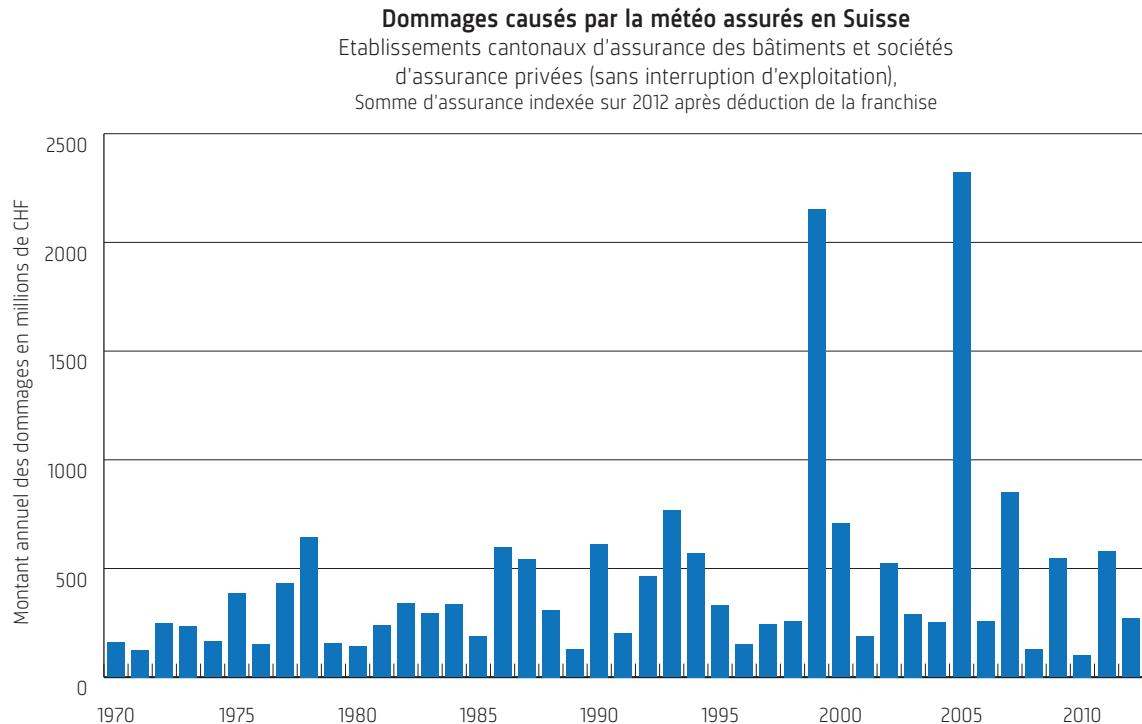


Figure 2.22: Dommages causés en Suisse par les événements météorologiques de 1970 à 2012. Ces dommages ont augmenté au cours des 30 dernières années. Cette augmentation est due en premier lieu à des facteurs socioéconomiques tels que la progression des valeurs assurées ou la vulnérabilité croissante des bâtiments. (Source: Association Suisse d'Assurances 2011)

long terme dans des emprunts d'Etat et d'entreprise et est ainsi à disposition de gouvernements et de l'économie (Swiss Re 2010).

## L'assurabilité

L'assurance met du capital à disposition pour couvrir des dommages causés par des dangers naturels; les futurs paiements de sinistres sont préfinancés par l'encaissement des primes. La condition essentielle est l'assurabilité des dangers naturels. L'assurabilité n'est pas déterminée par une formule fixe, mais tient à une série de critères qui doivent être satisfaits pour qu'un risque puisse être assuré (Swiss Re 2010):

- **La réciprocité:** Le preneur d'assurance et l'assureur forment une communauté et partagent les risques à des conditions économiques et loyales.
- **Le caractère aléatoire:** Un événement assuré qui survient en un lieu donné arrive à un moment qui n'est pas prévisible et se produit indépendamment de la volonté de l'assuré aussi bien que de l'assureur. Des dommages qui se répètent fréquemment sont en revanche incompatibles avec le principe de l'assurabilité. Il faut donc

prendre des mesures préventives si l'on veut réduire les dommages de tels événements.

- **L'évaluabilité:** La fréquence et l'ampleur des sinistres doivent pouvoir être quantifiées dans un intervalle de temps approprié.
- **La rentabilité:** Pour l'assureur, le prix inclut les coûts attendus des dommages ainsi que les frais d'acquisition et d'administration. Le prix doit en outre permettre un rendement approprié du capital, qui satisfasse aussi les attentes des investisseurs (par exemple des actionnaires). Une aggravation des dommages et une augmentation de la fréquence des sinistres entraînent à terme la hausse des primes et l'adaptation des conditions d'assurance.

Le changement climatique peut donc influencer l'assurabilité de dangers naturels, notamment en modifiant la fréquence des sinistres: d'une part, certains événements peuvent survenir plus souvent et n'être alors plus assurables; d'autre part, des événements très rares et non évaluables aujourd'hui peuvent devenir plus fréquents et donc évaluables et assurables.

## La situation nationale

En Suisse, 99 pour cent des bâtiments privés et des biens mobiliers sont assurés aujourd’hui contre les dommages dus à des événements naturels tels que les crues, les inondations, les tempêtes, la grêle, les avalanches, la pression de la neige, les éboulements, les chutes de pierre et les glissements de terrain (Association Suisse d’Assurances 2011).

Les dommages aux bâtiments, dus à des causes naturelles, ont augmenté en Suisse ces dernières années (cf. fig. 1). Cette hausse tient en premier lieu à des facteurs socioéconomiques, tels que la progression des valeurs assurées ou la vulnérabilité croissante des bâtiments (CH2050; IPCC 2014/WGII) du fait de changements architecturaux, des matériaux employés ou de l’implantation de constructions dans des zones à risque. En outre, étant donné que la période prise en compte est relativement courte pour un suivi des événements extrêmes, des variations naturelles jouent également un rôle important dans la tendance observée – par exemple la survenance fortuite d’événements (tels que la tempête « Lothar » en 1999 ou les inondations de 2005) dont la période de retour peut être très supérieure à l’intervalle de temps considéré. Vu l’influence des facteurs socioéconomiques et des mesures de prévention, il est difficile d’estimer la part du changement climatique dans l’augmentation des dommages (IPCC 2014/WGII). Des analyses quantitatives sont encore à venir.

Les dangers naturels qui causent des dommages en Suisse sont avant tout les tempêtes de vent, les inondations, les fortes précipitations, la grêle et les vagues de chaleur, et en second lieu des mouvements de masse tels que les avalanches, les chutes de pierres ou les laves torrentielles. Les inondations sont à l’origine de plus de la moitié des dommages des catastrophes naturelles qui se sont produites en Suisse pendant les 40 années passées (Swiss Re 2013). En outre, les vagues de chaleur menacent la santé des enfants en bas âge ainsi que des personnes âgées ou atteintes de maladies chroniques ; ce sont ces périodes caniculaires qui ont causé le plus de décès dus à des catastrophes naturelles pendant ces dernières années (OFEV 2013).

## Evolution future

L’évolution du climat entraînera des changements de la fréquence, de la durée et de l’intensité de dangers naturels. La force des modèles climatiques actuels réside dans leur capacité de prévoir des valeurs moyennes mondiales, notamment celles de la température. Ils ont beaucoup plus de difficulté à rendre compte de phénomènes régionaux et locaux tels que des précipitations extrêmes. Il est très

## L’assurance des bâtiments en Suisse

En Suisse, l’assurance des bâtiments inclut à la fois l’incendie et les éléments naturels (crues, inondations, tempêtes, grêle, avalanches, pression de la neige, éboulements, chute de pierres et glissements de terrain). Dans 19 cantons, un établissement cantonal en détient le monopole. Dans les autres cantons, des sociétés d’assurance privées proposent une assurance éléments naturels pour les bâtiments. Cette assurance est obligatoire dans tous les cantons (à l’exception de ceux de Genève, du Tessin et du Valais). Dans toute la Suisse, les primes d’assurance ainsi que la franchise sont réglementées et fixées par des dispositions législatives de la Confédération et des cantons. Les assurances ménage et inventaire (contenu du bâtiment) ne sont obligatoires que dans les cantons de Vaud et de Nidwald et y sont délivrées par les établissements cantonaux d’assurance des bâtiments. Dans les autres cantons, des sociétés d’assurance privées proposent également ces services.

Les établissements cantonaux d’assurance des bâtiments offrent une protection illimitée, tandis qu’une limite de responsabilité de un milliard de francs par événement s’applique dans toute la Suisse à l’ensemble des assureurs de droit privé. Tous les assurés doivent supporter solidairement ce « frein aux catastrophes » (Finma 2013).

probable que la durée et l’intensité des vagues de chaleur s’accroîtra ; une augmentation des périodes sèches est également attendue. Les données sur l’évolution future des fortes précipitations et de la grêle en Suisse comportent de grandes incertitudes ; il est néanmoins prévisible que l’intensité des fortes précipitations croîtra, car l’atmosphère a une teneur en eau plus élevée quand la température est plus haute. Le chapitre 5 des Swiss Climate Change Scenarios (CH2011 2011) comprend une synthèse du savoir actuel sur les changements attendus des dangers naturels atmosphériques.

Le changement climatique pourrait accroître indirectement la vulnérabilité de constructions, car des mesures d’atténuation et d’adaptation, telles que l’assainissement de bâtiments (par exemple la pose ultérieure d’une isolation extérieure), l’installation de panneaux solaires sur des toits ou le placement de stores pare-soleil, augmentent le potentiel de dommages pour certains événements.

## Le rôle actif de l'industrie de l'assurance

L'adaptation au climat est une tâche urgente qui fait appel à des décisions tant sur le plan national que local. De nombreuses mesures d'adaptation connues permettent de réduire la vulnérabilité de régions, communes et villes à l'égard du changement climatique (OFEV 2013). Un dialogue régulier a lieu à ce sujet entre tous les acteurs, notamment en ce qui concerne la collaboration suprasedicrielle avec les pouvoirs publics.

L'industrie de l'assurance évalue et couvre des risques, aussi est-il impératif pour elle de détecter à temps les nouvelles menaces et de les comprendre. A ce titre, elle est prédestinée à jouer un rôle important et actif dans la gestion du changement climatique. Des mesures d'adaptation, telles que la protection contre les crues, la planification des zones ou la mise à jour de prescriptions sur la construction, permettent d'abaisser les primes d'assurance. Ceci ne vaut d'ailleurs pas seulement pour l'évolution du climat, mais aussi pour l'élimination de lacunes de protection contre des dangers qui existent déjà aujourd'hui. D'autre part, des facteurs tels que l'augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements accroissent les risques et font monter les primes. En Suisse, l'assurance des dommages dus à des événements naturels est réglementée par la loi et les primes sont fixées par l'Etat (cf. encadré L'assurance des bâtiments en Suisse, p. 141).

En identifiant et évaluant (par exemple en termes de coût) les risques actuels, mais aussi futurs, l'assurance crée des bases pour l'assurabilité à long terme. Et en favorisant les efforts de prévention, par exemple par des allègements de primes, elle incite à adopter un comportement prévisionnel et à prévenir les risques. Par ailleurs, des mesures d'adaptation permettant de renforcer la résilience climatique existent (IPCC 2012/SREX; IPCC 2014/WGII).

## Le rôle des banques et des gérants de fortune

Les mesures d'adaptation accroissent les besoins de financement d'infrastructures tant dans le secteur public que privé (Swiss Re 2014). L'industrie des services financiers peut jouer ici un rôle d'intermédiaire. En développant de nouveaux modèles de financement, elle peut contribuer à ce que suffisamment de capital soit mis à disposition pour ces mesures d'adaptation.

Les effets globaux du changement climatique modifient les conditions pour les entreprises et ont également un impact sur l'évaluation des placements. Ceci entraîne de nouveaux risques dans les opérations de placement, qui concernent tant les investisseurs institutionnels que pri-

vés (Mercer 2011). Les caisses de pension notamment, qui gèrent du capital à titre fiduciaire, sont tributaires de services de gestion de fortune qui tiennent compte autant que possible des risques climatiques. Pour cela, des méthodes sont nécessaires pour évaluer l'influence du changement climatique sur la valeur des placements. Les banques et les gérants de fortune sont appelés à développer de telles méthodes et à les intégrer dans leur gestion d'actifs. Les risques climatiques peuvent être pris en compte aussi bien lors de la définition de la stratégie de placement et du choix des catégories d'actifs que lors de la sélection des placements (par exemple CSSP & SPG 2015). Une possibilité consiste à calculer les émissions totales de CO<sub>2</sub> d'un portefeuille en additionnant les émissions des différentes firmes en proportion de leur part. Certains investisseurs vont même jusqu'à exclure de leurs placements des entreprises qui émettent beaucoup de CO<sub>2</sub> (par exemple des sociétés pétrolières).

## Défis pour la Suisse

En conséquence du changement climatique, le secteur des assurances doit relever des défis touchant à l'estimation des primes, à la prévention, à la rareté du capital après des événements particulièrement graves et à l'augmentation du montant des dommages (IPCC 2014/WGII). Une question fondamentale est de juger de la possibilité même d'une assurance (IPCC 2014/WGII). Elle devient significative pour la Suisse dès qu'une influence du changement climatique sur l'évolution du montant des dommages est constatée ou attendue. Des mesures d'adaptation possibles dans le secteur des assurances comprennent les hausses de primes, la réduction de la couverture d'assurance, l'élargissement de la répartition des risques et la création d'incitations visant à diminuer les risques (IPCC 2014/WGII).

S'ils ne sont pas assurés, les dommages dus à des catastrophes naturelles représentent une charge financière considérable pour les particuliers et pour l'Etat. C'est le plus souvent l'Etat – et donc le contribuable – qui paie la facture en cas de graves catastrophes. Après un événement, le gouvernement doit immédiatement se charger des coûts des mesures d'intervention et d'aide directe; il assume en outre les coûts subséquents de grands projets d'infrastructures lorsque des routes endommagées ou d'autres équipements et installations publics doivent être remis en état. Une assurance est un mécanisme financier de prévoyance pour l'économie et les particuliers qui ne disposent pas des moyens financiers d'un Etat pour couvrir le coût des dommages.

La protection contre les dangers naturels se réfère aujourd'hui aux principes de la gestion intégrale des risques,

qui instaure une approche globale des dangers naturels avec toutes les parties concernées. La Confédération, les cantons et les communes, ainsi que les assurances et la population collaborent à une approche prévisionnelle des risques naturels leur permettant d'agir précocelement et pas seulement de réagir. Si l'évolution du climat entraîne en Suisse un changement de la fréquence des dangers naturels causant des dommages, des adaptations peuvent devenir nécessaires en matière de gestion intégrale des risques, avec les conséquences suivantes pour l'assurabilité des événements et la nécessité de les prévenir:

- Si un événement de peu d'envergure se produit localement beaucoup plus fréquemment, par exemple tous les trois ans en moyenne au lieu de tous les 15 ans, l'assurer n'est éventuellement plus rentable. S'il n'est alors plus assurable, il faut prendre d'autres mesures, de caractère préventif, par exemple en matière de construction. A noter que des mesures de prévention supplémentaires peuvent être envisagées aussi pour des événements qui sont encore assurables.
- Si des événements de très grande envergure – qui ne sont pas assurables en ce moment, parce qu'ils sont trop rares (par exemple une fois tous les 1000 ans en moyenne) pour satisfaire au principe de l'évaluabilité – se produisent plus fréquemment et deviennent ainsi évaluables, les assurances devraient proposer des possibilités de les assurer et accroître à cette fin leur couverture en capital.

De grands investisseurs internationaux attendent aujourd'hui déjà que de tels risques climatiques soient pris en compte dans la gestion de fortune. De ce fait, il est important que les banques et les gérants de fortune suisses établissent des processus permettant de prendre en considération les risques climatiques auxquels des installations sont exposées et qu'ils développent ces méthodes en permanence afin de rester concurrentiels au niveau international.

S'adapter au changement climatique est plus avantageux qu'attendre, bien que ce ne soit pas gratuit – et ne peut être financé que si le changement climatique et ses impacts sont limités au maximum.

## Bibliographie

- Association Suisse d'Assurances (2011) *Die einzigartige Elementarschadenversicherung*. [www.svv.ch/fr](http://www.svv.ch/fr)
- CH2011 (2011) *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- CH2050 (2007) *Les changements climatiques et la Suisse en 2050. Impacts attendus sur l'environnement, la société et l'économie*. OcCC, ProClim (eds.), Berne, 168 pp.
- CSSP, SPG (2015) *Risque carbone pour la place financière suisse*. Center for Social and Sustainable Products & South Pole Group (eds.), Zurich/Vaduz, 94 pp.
- Finma (2013) *Assurance des dommages dus aux événements naturels en Suisse (assurance DN)*. Histoire et champ d'application. [www.finma.ch](http://www.finma.ch)
- IPCC (2012) Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX). [www.ipcc.ch/report/srex](http://www.ipcc.ch/report/srex)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)*. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- Mercer (2011) *Climate Change Scenarios – Implications for strategic asset allocation*. Mercer, London.
- OFEV (2013) *Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton Aargau*. Rapport. Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- Swiss Re (2010) *Wegweisende Einführung in die Rückversicherung*. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)
- Swiss Re (2013) *Geschichte der Versicherung in der Schweiz*. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)
- Swiss Re (2014) *Economics of Climate Adaptation – Shaping climate resilient development: A global overview of case studies with a focus on infrastructure*. [www.swissre.com](http://www.swissre.com)

## 2.18 Stratégies et mesures de la Confédération en matière d'adaptation aux changements climatiques

**Les conséquences de l'évolution du climat, à savoir une hausse des températures ainsi que des changements en matière de précipitations et de catastrophes naturelles, se manifestent déjà en Suisse.** Il faut s'attendre à ce qu'elles deviennent encore nettement plus sensibles, surtout à partir du milieu du XXI<sup>e</sup> siècle. Afin de soutenir le mieux possible l'administration, la société, l'économie et l'environnement, la Confédération a élaboré la stratégie «Adaptation aux changements climatiques». Ses objectifs sont de minimiser les risques des changements climatiques, de protéger la population, les biens et les ressources naturelles vitales, ainsi que d'augmenter la capacité d'adaptation de la société, de l'économie et de l'environnement. Cette stratégie inclut un plan d'action de 63 mesures à concrétiser de 2014 à 2019. Pour la mettre en œuvre avec succès, il est indispensable de l'intégrer à d'autres stratégies et politiques de la Confédération. Cependant, l'adaptation n'est pas seulement une tâche de l'Etat: elle nécessite la participation de tous les acteurs concernés.

*Marco Pütz (WSL), Anthony Patt (EPF de Zurich), Roland Hohmann (OFEV)*

### Les bases de l'adaptation

Il n'y a pas de recette miracle pour l'adaptation à l'évolution du climat. Les impacts des changements climatiques présentent de grandes différences géographiques et temporelles. C'est pourquoi les mesures d'adaptation doivent être planifiées et mises en œuvre en fonction des conditions et expériences concrètes propres au lieu considéré. Les activités d'adaptation les plus répandues aujourd'hui ont trait aux assurances ou à des mesures techniques contre des dangers naturels, telles que les ouvrages de protection contre les crues ou contre les coulées de boue. Mais d'autres activités gagnent en importance – c'est le cas notamment de mesures écosystémiques, institutionnelles ou sociales, par exemple les mises en garde et les alarmes dans le domaine de la santé.

L'adaptation peut être autonome ou planifiée. Alors que l'adaptation autonome (ou spontanée) se fait en toute indépendance, sans projet et inconsciemment, l'adaptation planifiée est ciblée sur des changements climatiques réels ou attendus et sur leurs conséquences. Il est possible aussi

de distinguer entre mesures d'adaptation techniques, écosystémiques, légales, ou encore orientées sur la gestion ou sur la politique.

Les efforts d'adaptation sont particulièrement efficaces quand ils permettent de créer des synergies et des situations de win-win (co-bénéfices) avec d'autres activités. Lors du choix des mesures d'adaptation, il faut donner l'avantage à des dispositions souples et centrées sur l'éducation.

### Circonstances entravantes

Les circonstances suivantes sont des entraves à la planification des activités d'adaptation et à leur mise en œuvre:

- les conséquences locales de l'évolution du climat sont mal connues,
- les ressources financières et humaines sont insuffisantes,
- la coordination des activités d'adaptation ne recouvre pas l'ensemble des échelons administratifs et des secteurs,
- les risques climatiques sont trop peu connus et donnent lieu à des évaluations divergentes,
- les mesures prises et leurs effets, et par conséquent les coûts et bénéfices, sont décalés dans le temps et
- le leadership fait partiellement défaut dans la politique, l'administration ou l'économie.

La recherche de trajectoires de développement qui combinent les mesures de protection du climat et d'adaptation aux changements climatiques pour promouvoir la durabilité est au cœur du débat au niveau international. Toutefois, les synergies entre protection du climat et adaptation ne représentent pas forcément les mesures les plus efficaces (IPCC 2014/WGII/SPM).

### Adaptation aux changements climatiques

On entend par adaptation aux changements climatiques le processus de mise en accord de systèmes naturels et sociaux avec l'évolution du climat et ses conséquences. Elle a pour objectif d'atténuer les effets négatifs et d'exploiter les avantages de ces développements. En Europe, les principaux champs d'action de l'adaptation au climat portent sur les canicules, les précipitations extrêmes, l'élévation du niveau de la mer, les crues, ainsi que sur l'altération des ressources en eau et de la biodiversité (IPCC 2014/WGII/SPM).

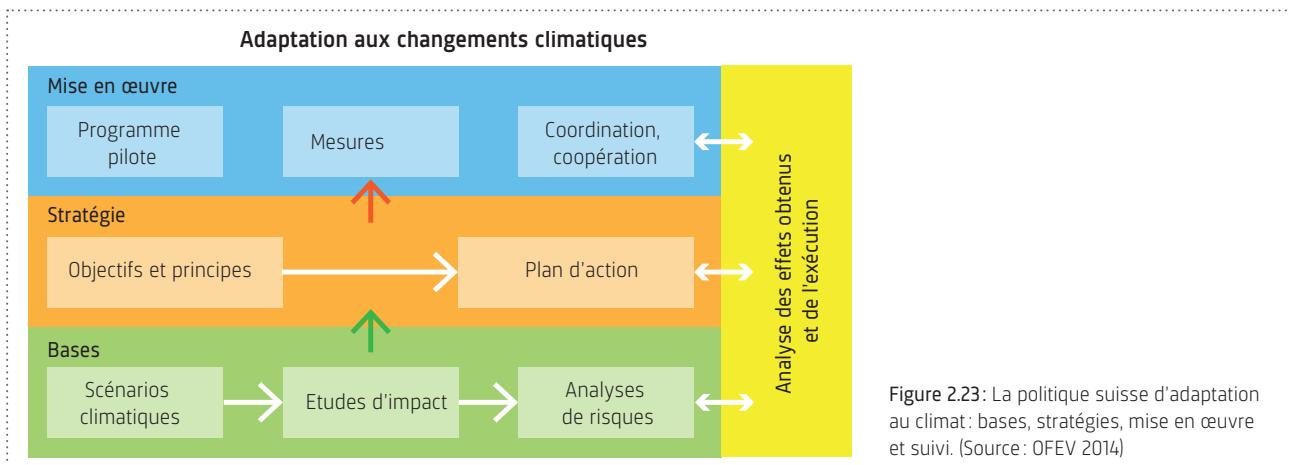


Figure 2.23: La politique suisse d'adaptation au climat: bases, stratégies, mise en œuvre et suivi. (Source: OFEV 2014)

## La stratégie du Conseil fédéral en matière d'adaptation

L'article 8 de la loi sur le CO<sub>2</sub> prévoit que la Confédération coordonne des activités d'adaptation aux changements climatiques et prend des dispositions visant à améliorer le savoir nécessaire à cette fin. En conséquence, le Conseil fédéral a chargé l'administration d'élaborer une stratégie d'«adaptation aux changements climatiques en Suisse».

### Premier volet de la stratégie: les objectifs, défis et champs d'action

Le premier volet de la stratégie a été adopté le 2 mars 2012. Il contient les objectifs, les défis et les champs d'action de l'adaptation au climat en Suisse (OFEV 2012). Les trois objectifs de la stratégie consistent à:

- exploiter les opportunités offertes par les changements climatiques,
- minimiser les risques des changements climatiques et protéger la population, les biens et les ressources naturelles vitales et
- accroître la capacité d'adaptation de la société, de l'économie et de l'environnement.

En outre, la stratégie comporte neuf approches partielles dédiées à autant de secteurs spécifiques (gestion des eaux, gestion des dangers naturels, agriculture, économie forestière, énergie, tourisme, gestion de la biodiversité, santé, développement territorial) et examine douze défis transsectoriels.

### Deuxième volet de la stratégie: le plan d'action 2014-2019

Le 9 avril 2014, le Conseil fédéral a approuvé un plan d'action, qui constitue le deuxième volet de sa stratégie d'adaptation aux changements climatiques (OFEV 2014). Ce plan d'action comprend des mesures déjà appliquées, prévues concrètement ou à développer, destinées à mettre en œuvre la stratégie d'adaptation pendant les années 2014 à 2019 et à préparer la Suisse aux conséquences des changements climatiques. Parmi les 63 mesures du plan d'action, 54 se répartissent entre les neuf secteurs précités et doivent être réalisées dans le cadre des politiques sectorielles respectives. Cinq autres dispositions sont transsectorielles: elles visent à améliorer la base de connaissance. Les quatre dernières mesures servent à promouvoir la collaboration entre la Confédération, les cantons, les villes et les communes. Les progrès réalisés dans la mise en œuvre de la stratégie et l'effet obtenu sont contrôlés régulièrement. En 2019 au plus tard, la décision sera prise concernant la phase ultérieure du processus d'adaptation aux changements climatiques.

### Harmoniser les stratégies

Pour que les activités d'adaptation au climat atteignent leur objectif, il est important que la stratégie d'adaptation soit intégrée à d'autres stratégies et politiques de la Confédération ou qu'elle soit retenue comme complément de ces dernières et prise en compte dans leur mise en œuvre. Il y a nécessité d'harmonisation entre autres avec

- la stratégie « Sécurité contre les dangers naturels », de la PLANAT,
- la mise en œuvre du rapport « Gérer les pénuries locales d'eau en Suisse »,
- la stratégie Climat pour l'agriculture,

- la loi sur les forêts,
- la Stratégie énergétique 2050,
- la Stratégie de croissance pour la place touristique suisse,
- la Stratégie Biodiversité Suisse,
- la stratégie Santé animale en Suisse 2010+ et
- le Projet de territoire suisse.

## Encouragement et mise en œuvre d'activités d'adaptation au climat menées en Suisse

L'adaptation au climat planifiée en Suisse se fonde sur des bases scientifiques solides et sur une stratégie nuancée. Elles sont induites par différentes mesures et soutenues par un programme pilote. Le développement de ces bases, la stratégie et sa mise en œuvre font l'objet d'un suivi permettant d'évaluer les effets et l'exécution de l'adaptation (fig. 2.23). Les activités de la Confédération en matière d'adaptation au climat ne conduiront au succès que si les acteurs concernés participent activement et prennent eux-mêmes des initiatives.

## L'analyse des risques et des opportunités climatiques jusqu'en 2060

L'analyse des risques et opportunités climatiques constitue, aux côtés des scénarios climatiques (CH2011) et des études d'impact (CH2014), une base importante des activités d'adaptation au climat menées en Suisse. Une méthode a été développée pour cette analyse: elle permet d'examiner les risques et opportunités de l'évolution du climat et de les évaluer quantitativement ou qualitativement, ceci au niveau transsectoriel et en fonction de différents dangers et effets climatiques (Holthausen et al. 2011). Cette méthode tient compte aussi bien des changements climatiques que démographiques et socioéconomiques prévus en Suisse par les projections. Cette analyse est effectuée dans les six grandes régions du pays: le Plateau, les Alpes, les Préalpes, le Jura, la Suisse méridionale et les grandes agglomérations. Au moins un canton représentatif est examiné dans chacune de ces régions. Réalisée dans le canton d'Argovie, la première étude de cas (EBP et al. 2014) montre que les changements climatiques entraînent des risques pour la biodiversité et la santé, mais que l'on peut, par contre, en attendre de légers avantages dans l'agriculture et en ce qui concerne la consommation d'énergie. L'analyse portant sur l'ensemble de la Suisse sera à disposition probablement à mi-2017.

## Programme pilote d'encouragement de projets innovants dans les régions

Pour encourager les activités d'adaptation dans les régions, l'Office fédéral de l'environnement, en partenariat avec d'autres services de la Confédération, a lancé en 2013 le « Programme pilote adaptation aux changements climatiques ». Des projets innovants et exemplaires d'adaptation aux changements climatiques sont réalisés dans des cantons, des régions et des communes avec le soutien financier de la Confédération. Les 31 projets sélectionnés parmi la centaine de propositions reçues se répartissent entre cinq domaines thématiques: gestion des modifications écosystémiques et de l'utilisation des terres, gestion des pénuries locales d'eau, gestion des dangers naturels, transfert de connaissances et gouvernance, développement urbain adapté aux changements climatiques. Les premiers projets ont démarré en janvier 2014. Tous les projets seront terminés fin 2016; l'ensemble du programme s'achèvera en 2017 par un rapport de synthèse.

## Activités d'adaptation des cantons et des régions

Indépendamment du programme pilote, les cantons et les régions élaborent des stratégies et des mesures d'adaptation. Dans le canton d'Uri, par exemple, le Conseil d'Etat a décidé, en 2011, de mettre sur pied une stratégie pour faire face aux changements climatiques (Canton d'Uri 2011). Elle formule des objectifs et des étapes de mise en œuvre en matière d'adaptation, de réduction des émissions de gaz à effet de serre, de suivi et de production de savoir, ainsi que de communication et d'information. Au début 2016, le canton des Grisons a adopté sa stratégie climatique qui traite à la fois de la prévention et de l'adaptation (ANU 2015). Les cantons de Bâle-Ville, de Schaffhouse, de Berne, d'Argovie et de Zurich (en collaboration avec la Conférence internationale du lac de Constance) ont établi des vues d'ensemble sur les conséquences régionales des changements climatiques, les mesures à prendre et les possibilités d'adaptation.

Ces prochaines années, les activités d'adaptation commencées seront complétées et développées. Elles comprennent, entre autres bases importantes, des nouveaux scénarios climatiques régionalisés, planifiés pour 2018. Les résultats de l'analyse de l'exécution et de l'effet obtenu, qui devraient être à disposition en 2018, seront également d'un grand intérêt, car ils se fondent entre autres sur les rapports intermédiaires des cantons et des offices fédéraux concernés – rapports qui ont été exigés pour la première fois pour fin 2015. Partant des expériences concrètes faites sur le terrain en matière de mise en œuvre d'activités d'adaptation, un second plan d'action devrait être élaboré à partir de 2018.

## Bibliographie

- ANU (2015) **Klimawandel Graubünden. Synthese der Herausforderungen und Handlungsfelder.** Arbeitspapier 4 einer kantonalen Klimastrategie. Coire, 27 pp.
- Canton d'Uri (2011) **Umgang mit dem Klimawandel. Klimastrategie des Kantons Uri.** Sur mandat du Conseil d'Etat du canton d'Uri. Altdorf, 46 pp.
- CH2011 (2011) **Swiss Climate Change Scenarios CH2011.** Published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp. ISBN: 978-3-033-03065-7
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland.** Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- EBP, WSL, SLF (2014) **Risiken und Chancen des Klimawandels im Kanton Aargau.** Rapport. Office fédéral de l'environnement (OFEV).
- Holthausen N, Perch-Nielsen S, Locher P, de Haan van der Weg P, Pütz M, Bründl M (2011) **Pilotprojekt Analyse klimabedingter Risiken und Chancen in der Schweiz.** Rapport. Sur mandat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV) et de l'Office fédéral du développement territorial (ARE). Ernst Basler + Partner AG, Zollikon, Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf, 145 pp.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).** Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg2](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2)
- OFEV (2012) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Objectifs, défis et champs d'action.** Premier volet de la stratégie du Conseil fédéral du 2 mars 2012. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)
- OFEV (2014) **Adaptation aux changements climatiques en Suisse – Plan d'action 2014–2019.** Deuxième volet de la stratégie du Conseil fédéral du 9 avril 2014. Berne. [www.bafu.admin.ch/adaptation-climat](http://www.bafu.admin.ch/adaptation-climat)



## Partie 3 : Atténuation

### Auteures et auteurs

#### Daniel Bretscher

Collaborateur scientifique, groupe de recherche « Climat et hygiène de l'air » d'Agroscope, Zurich

#### Dr Peter de Haan

Partenaire et chef du groupe Politique énergétique et mobilité, Ernst Basler + Partner, Zollikon

#### Prof. Dr Adrienne Grêt-Regamey

Professeure en aménagement du paysage et des systèmes urbains à l'Institut développement du territoire et du paysage (IRL) de l'EPF de Zurich

#### Prof. Dr Reto Knutti

Professeur de physique climatique à l'Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

#### PD Dr Jens Leifeld

Chercheur senior, groupe de recherche « Climat et hygiène de l'air » d'Agroscope, Zurich

#### Prof. Dr Dirk Messner

Directeur de l'Institut allemand de politique de développement, Bonn

#### Dr Christoph Ritz

Jusqu'en mars 2016: Directeur de ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

#### Dr Carmenza Robledo Abad

Chercheuse senior associée, USYS-TdLab (laboratoire interdisciplinaire) et groupe Protection du climat et adaptation, EPF de Zurich

#### Dr Joeri Rogelj

Chercheur boursier, programme Energie, Institut international d'analyses des systèmes appliqués (IIASA), Laxembourg  
Jusqu'en juin 2014: Post-doctorant, Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

#### Dr Regine Röthlisberger

Cheffe de la section Rapports climatiques et adaptation de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

#### Prof. Dr Jean-Louis Scartezzini

Professeur de physique du bâtiment, chef du Laboratoire d'énergie solaire et de physique du bâtiment (LESBat) de l'EPF de Lausanne

#### Prof. Dr Renate Schubert

Professeure d'économie nationale à l'Institut pour les décisions environnementales (IED) de l'EPF de Zurich

#### Prof. Dr Philippe Thalmann

Professeur d'économie de l'environnement naturel et construit, Institut d'architecture et de la ville (IA) de l'EPF de Lausanne

#### Prof. Dr Alexander Wokaun

Responsable du domaine de recherche « Energie et environnement » de l'Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen



## La décarbonisation – transformation vers la compatibilité climatique

**Le réchauffement planétaire ne peut être ralenti que grâce à une coopération internationale et à une économie mondiale compatible avec le climat, et donc à faibles émissions de carbone. La conversion vers une telle économie mondiale va au-delà de l'évolution structurelle d'une économie de marché et implique des processus de transformation en profondeur. Il y a différentes raisons de parler d'une « grande mutation » – comparable peut-être aux seules révolutions néolithique et industrielle, les deux poussées majeures de la civilisation dans l'histoire de l'humanité.**

*Dirk Messner (Deutsches Institut für Entwicklungspolitik)*

Des réductions radicales des émissions de gaz à effet de serre des Etats membres de l'Organisation de coopération et de développement économique (OCDE) ne suffisent plus pour respecter l'objectif des deux degrés. De 1990 à 2013, les émissions annuelles de gaz à effet de serre de ce groupe des nations industrialisées ont passé d'un peu plus de 11 à environ 13 gigatonnes de CO<sub>2</sub> et stagnent depuis lors à peu près à ce niveau. Pendant la même période, celles des pays non-membres de l'OCDE ont évolué de 10 à 20 gigatonnes, surtout en raison de la forte croissance des pays émergents (OECD 2010; Kaplinsky & Messner 2008). Si les tendances actuelles se poursuivent, les émissions annuelles des pays de l'OCDE devraient se stabiliser, entre 2010 et 2040, à un niveau d'environ 12 à 13 gigatonnes, alors que dans le même intervalle de temps, celles des Etats non-OCDE passeront de 20 à une bonne trentaine de gigatonnes (IPCC 2014/WGIII/Chap.7). C'est pourquoi le réchauffement planétaire ne peut être ralenti que par un effort conjugué des pays industrialisés et émergents (fig. 3.1). Une protection efficace du climat n'est encore possible que si les modèles de croissance de l'économie mondiale sont définis en conséquence.

### Une économie mondiale à faibles émissions de carbone

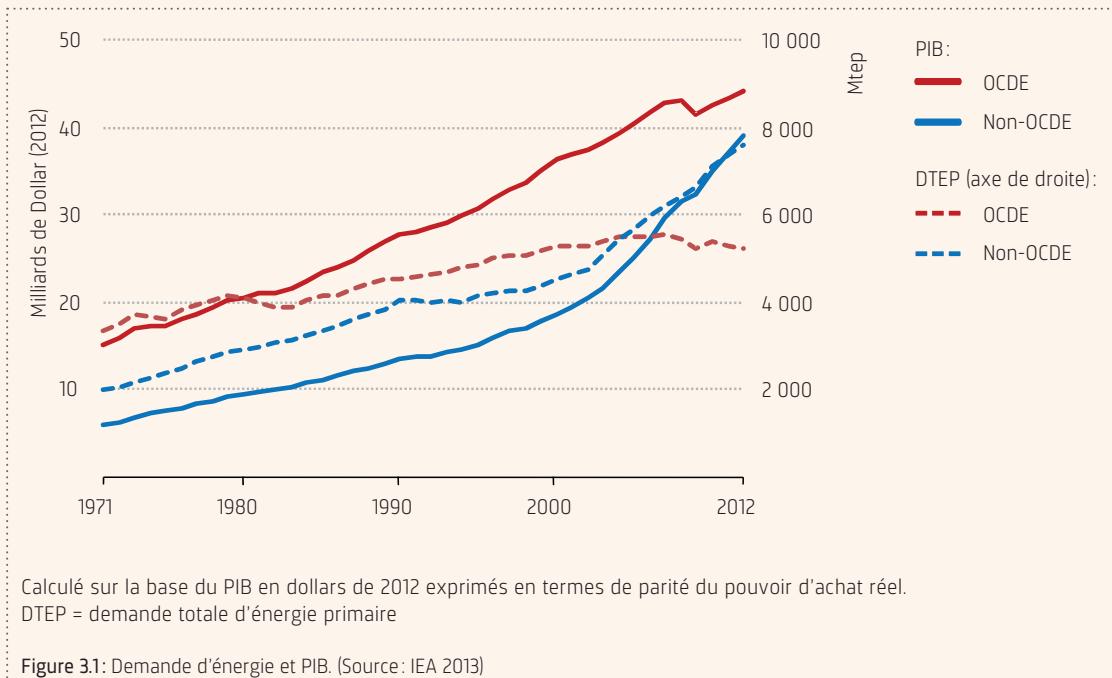
La protection mondiale du climat est devenue synonyme d'instauration d'une économie à faibles émissions de carbone (Messner 2015; World Bank 2012 & 2014). L'établissement d'une économie compatible avec le climat requiert des processus de décarbonisation dans trois domaines centraux (WBGU 2011; IPCC 2014/WGIII; cf. chap. 3.4 Energie, S. 168):

- les systèmes énergétiques, partout dans le monde, qui sont responsables d'environ 70 pour cent des émissions mondiales de gaz à effet de serre,
- l'utilisation du sol (exploitation de la forêt, agriculture), qui cause environ 25 pour cent des émissions et
- les espaces urbains, parce qu'une grande partie des émissions est imputable aux besoins en matière d'habitat (bâtiments) et de mobilité dans les villes.

L'urbanisation a une importance particulière, parce que le nombre d'êtres humains qui vivent dans des espaces urbains augmentera de 3 milliards aujourd'hui à 6 milliards en 2050 (WBGU 2016). Les bâtiments et les systèmes de mobilité sont des infrastructures qui ne peuvent être adaptées que très lentement et qui détermineront donc les trajectoires d'émission pour de nombreuses décennies (IEA 2010). La poussée de l'urbanisation, qui se concentre dans les pays non-OCDE, surtout ceux de l'Asie, suivra-t-elle les modèles à faibles émissions de CO<sub>2</sub>? Ou reproduira-t-elle les dynamiques à fortes émissions de gaz à effet de serre, qui se sont établies dans le développement des villes des pays industrialisés (WBGU 2011)? Ce sont là des questions très importantes du point de vue de la protection du climat.

### La grande mutation

Dans la littérature spécialisée, le passage à une économie compatible avec le climat est discuté de plus en plus dans la perspective de processus de transition ou de transformation. Ceci met en évidence que la conversion vers une économie à faibles émissions de carbone (low-carbon-economy) va au-delà de modèles classiques de l'évolution structurelle de l'économie de marché et implique des processus de transformation en profondeur (Rotmans et al. 2001; Grin et al. 2010). Le Conseil consultatif allemand sur les changements environnementaux globaux (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, WBGU) qualifie de « grande mutation » la transition vers une économie mondiale compatible avec le climat et à tous égards durable (WBGU 2011). Il est possible que celle-ci ne soit comparable qu'aux deux poussées majeures de la civilisation dans l'histoire de l'humanité: les révolutions néolithique et industrielle.



## Cinq raisons de parler d'une grande mutation

Du point de vue du WBGU, on trouve dans la littérature cinq chaînes d'arguments qui donnent de bonnes raisons de parler d'une grande mutation.

### Le développement mondial doit s'engager sur une nouvelle trajectoire

La transition vers la compatibilité climatique ne peut réussir que si les modèles mondiaux de développement changent dans le sens de la décarbonisation – s'ils s'engagent donc au niveau mondial sur une nouvelle trajectoire de développement. Le succès de cette nouvelle orientation dépend d'une part de la détermination des pays industrialisés à lancer ce processus de transition. Il est essentiel d'autre part que les pays émergents en croissance dynamique, qui se sont conformés d'abord, pendant les deux dernières décennies, au schéma de croissance traditionnel, soient prêts et en mesure de placer la décarbonisation au centre de leurs efforts de développement (IPCC 2014/WGIII). Un tel changement des schémas de croissance presuppose **une transformation fondamentale des conditions-cadres institutionnelles** afin de créer des incitations aux investissements compatibles avec le climat (World Bank 2012; OECD 2013; Global Commission on the Economy and Climate 2014).

### Les infrastructures centrales doivent être transformées

Le développement d'une économie mondiale compatible avec le climat implique que les infrastructures centrales, sur lesquelles les sociétés humaines s'appuient, soient en grande partie transformées. Ces infrastructures doivent devenir des systèmes – énergétiques, urbains et d'utilisation du sol – qui consomment peu de ressources, produisent seulement de faibles émissions et résistent aux changements climatiques (Nakicenovic et al. 2000; WBGU 2016).

### Des innovations non seulement techniques, mais aussi sociales, sont nécessaires

Les stratégies de décarbonisation doivent se fonder sur des innovations techniques. Cependant, la littérature sur l'effet rebond (Jackson 2009; cf. chap. 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement, S. 164) explique qu'un découplage absolu entre le développement de la prospérité et les émissions ne peut réussir que moyennant l'adhésion à des innovations sociales, servant de bases à une société respectueuse du climat: des styles de vie et schémas de consommation différents, de nouveaux concepts de prospérité et de bien-être ainsi que des normes et des systèmes de valeurs ayant comme ligne directrice la conservation des biens communs mondiaux (OECD 2013; Skidelsky & Skidelsky 2013; Messner 2015).

### La fenêtre temporelle pour la mutation est étroite

Si l'on veut encore atteindre l'objectif des 2 degrés, la fenêtre temporelle pour la transformation requise à cette fin est très étroite. Jusqu'en 2070 environ, les émissions de gaz à effet de serre produites par la combustion d'agents énergétiques fossiles devraient être abaissées à zéro dans le monde entier (IPCC 2014/WGIII; Kap. 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain, S. 156, chap. 3.4 Energie, p. 168). Pour y parvenir, plusieurs jalons essentiels doivent être posés pendant les deux prochaines décennies, tels que la transition vers une politique d'aménagement compatible avec le climat et vers la neutralité climatique des infrastructures et des villes. Ainsi la question se pose de savoir comment et si des dynamiques de cette transformation doivent être accélérées (Grin et al. 2010). En même temps, les émissions actuelles de gaz à effet de serre induisent des dynamiques à long terme dans le système de la Terre. Le risque existe que des points de basculement soient dépassés (Lenton et al. 2008) et que des changements excèdent largement l'horizon temporel pris en compte aujourd'hui par les institutions d'Etats nationaux ou par les organisations internationales. De ce fait, les notions de temps pertinentes pour les sociétés humaines changent, un peu comme cela fut le cas pendant la révolution industrielle (Osterhammel 2009; Leggewie & Messner 2012).

### L'humanité est devenue la principale force de changement du système de la Terre et doit maintenant le stabiliser

Si Paul Crutzen et autres (Crutzen 2000; Zalasiewicz 2011 et al.) voient juste en soutenant que l'humanité est devenue une force majeure de changement du système de la Terre, la transition vers un ordre économique et social durable implique que les êtres humains doivent inventer des institutions ainsi que des normes et des systèmes de valeurs pour assurer la stabilité du système de la Terre pendant l'ère de l'humanité (anthropocène) et pour préserver ainsi les moyens d'existence de nombreuses générations à venir. Les défis que pose une telle «gestion du système de la Terre» (Schellnhuber 1999) vont bien au-delà des actuelles visions du monde de la politique internationale.

### Blocages mondiaux de la coopération

La référence à la protection du climat dans le contexte des dynamiques d'évolution de la planète, ainsi que le débat sur le système climatique comme bien commun mondial (Ostrom 2010), débouchent sur la question de l'organisation de la coopération mondiale – une coopération qui permettrait de réaliser la transformation vers la compatibilité climatique (Keohane & Victor 2010; WBGU 2006; Messner & Weinlich 2016).

### Quatre causes principales de blocages

La littérature fait état de quatre causes principales de blocages dans les négociations sur le climat:

#### Des problèmes d'action collective

L'idée fondamentale de la *tragédie des biens communs* (Hardin 1968), qui se réfère au danger de la surexploitation de ressources librement disponibles, mais limitées, et la théorie de l'*action collective* (Olson 1965) renvoient au *parasitisme* des acteurs (Nordhaus 2013): des alliances de coopération (par exemple pour la protection du système climatique) se réalisent plus difficilement lorsque des acteurs qui n'y prennent pas part ne peuvent pas être empêchés de continuer de surexploiter ou vilipender des biens communs.

#### Des conflits de répartition entre les pays

Les pays industrialisés, émergents et en développement se disputent au sujet de la répartition des coûts découlant des réductions de gaz à effet de serre. Ils se querellent également à propos de la responsabilité qui incombe aux différents (groupes de) pays de réaliser de telles réductions, compte tenu de leurs émissions passées, présentes et futures (WBGU 2009; Pan 2009).

#### Le souci de la compétitivité économique ou du développement

Les décideurs craignent que des réductions d'émission radicales nuisent à la compétitivité de leur économie, entraînent une diminution de l'emploi ou – comme argumentent certains pays non industrialisés – puissent bloquer des processus visant à combler des retards de développement (OECD 2010).

#### La structure temporelle du problème du climat

Le problème du climat a une structure temporelle spécifique, en ce sens que les conséquences graves du changement climatique ne sont attendues que dans quelques décennies, alors qu'en politique, les systèmes et les décideurs réagissent en premier lieu à la pression actuelle des problèmes (Giddens 2009).

Les dimensions esquissées ici d'une mutation vers la décarbonisation mettent en évidence que la transition vers une économie et une société mondiales compatibles avec le climat entraînera des changements considérables, d'une portée comparable à ceux que la transformation de la société agraire en société industrielle a provoqués au XIX<sup>e</sup> siècle.

## Bibliographie

- Crutzen P (2000) **The Anthropocene**. The Global Change Newsletter 41: 17–18.
- Giddens A (2009) **The Politics of Climate Change**. Oxford University Press, Oxford.
- Global Commission on the Economy and Climate (2014) **The new Climate economy**. www.newclimateeconomy.report/2014
- Grin J, Rotmans J, Schot J (2010) **Transitions to Sustainable Development. New Directions in the Study of Long Term Transformative Change**. Routledge, London.
- Hardin G (1968) **The tragedy of the commons**. Science 162: 1243–1248.
- International Energy Agency (IEA) (2010) **Energy Balances of IEA Countries**. IEA, Paris.
- International Energy Agency (IEA) (2013) **World Energy Outlook 2013**. IEA, Paris.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. www.ipcc.ch/report/ar5/wg3
- Jackson T (2009) **Prosperity without Growth**. Routledge, London.
- Kaplinsky R, Messner D (2008) **The impacts of Asian Drivers on the developing world**. World Development 36: 197–209.
- Keohane R, Victor D (2010) **The Regime Complex for Climate Change**. The Harvard Project on International Climate Agreements. Harvard University, Cambridge.
- Leggewie C, Messner D (2012) **The low-carbon transformation – A social science perspective**. Journal of renewable and sustainable energy 4: 041404.
- Lenton T, Held H, Kriegler E, Hall J, Lucht W, Rahmstorf S, Schellnhuber H (2008) **Tipping elements in the Earth's climate system**. PNAS 105: 1786–1793.
- Messner D (2015) **A social contract for low carbon and sustainable development: reflections on non-linear dynamics of social realignments and technological innovations in transformation processes**. Technological Forecasting and Social Change 98: 260–270.
- Messner D, Weinlich S (2016) **The evolution of human cooperation: lessons learned for the future of global governance**. In: Messner, D., Weinlich, S. (eds.) *Global Cooperation and the Human Factor in International Relations*. Routledge, London: 3–46.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, de Vries B, Fenner J, Gaffin S, Gregory K, Grübler A, Jung TY, Kram T, Lebre La Rovere E, Michaelis L, Mori S, Morita T, Pepper W, Pitcher H, Price L, Riahi K, Roehrl A, Rogner H-H, Sankovski A, Schlesinger M, Priyadarshi S, Smith S, Swart R, van Rooijen S, Victor N, Dadi Z (2000) **Special Report on Emissions Scenarios**. Working Group III. Cambridge University Press, Cambridge.
- Nordhaus W (2013) **The climate casino**. Yale University Press, New Haven.
- Olson M (1965) **The Logic of Collective Action: Public Goods and the Theory of Groups**. Harvard University Press, Cambridge.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2010) **Perspectives on Global Development 2010: Shifting Wealth**. OECD, Paris.
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD) (2013) **How's Life? 2013 Measuring Well-being**. OECD, Paris.
- Osterhammel J (2009) **Die Verwandlung der Welt. Eine Geschichte des 19. Jahrhunderts**. Beck, München.
- Ostrom E (2010) **Polycentric systems for coping with collective action and global environmental change**. Global Environmental Change 20: 550–557.
- Pan J (2009) **Carbon budget proposal**. Research Center for Sustainable Development. Chinese Academy of Social Sciences, Peking.
- Rotmans J, Kemp R, van Asselt M (2001) **More evolution than revolution: transition management in public policy**. The Journal of Futures Studies, Strategic Thinking and Policy 3: 15–31.
- Schellnhuber H (1999) **Earth system' analysis and the second Copernican Revolution**. Nature 402: C19–C23.
- Skidelsky R, Skidelsky E (2013) **Wie viel ist genug?** Kunstmann, Muenchen.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2006) **Die Zukunft der Meere – zu warm, zu hoch, zu sauer**. Sondergutachten 2006. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2009) **Kassensturz für den Weltklimavertrag – Der Budgetansatz**. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2011) **Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation**. WBGU, Berlin.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) (2016) **Der Umzug der Menschheit: Die transformative Kraft der Städte**. WBGU, Berlin.
- World Bank (2012) **Inclusive Green Growth – The Pathway to Sustainable Development**. The World Bank, Washington.
- World Bank (2014) **Building Competitive Green Industries: The Climate and Clean Technology Opportunity for Developing Countries**. The World Bank, Washington.
- Zalasiewicz J et al. (2011) **The Stratigraphy of the Anthropocene**. Philosophical Transactions of the Royal Society A 369: 1036–1055.

## 3.1 Introduction

**La troisième partie du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC, la contribution du groupe de travail III, examine les possibilités de réduction des émissions de gaz à effet de serre ainsi que les conséquences socioéconomiques correspondantes. Cette analyse est tout d'abord présentée dans un résumé concernant l'ensemble de l'économie avant de s'intéresser aux secteurs individuels. La partie 3 du rapport «Coup de projecteur sur le climat suisse» reprend la même structure.**

*Philippe Thalmann (EPF de Lausanne)*

Les articles de Reto Knutti, Joeri Rogelj et Regine Röthlisberger pointent tout d'abord le doigt sur la nécessité d'agir afin de limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à l'échelle de la planète et de la Suisse (cf. chap. 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain, p. 156). En Suisse justement, la corrélation entre émissions et croissance démographique et économique a disparu dès la fin des années 1990 lorsque la croissance économique a repris sans que les émissions de CO<sub>2</sub> n'aumentent. Depuis 2010, les émissions diminuent même lentement malgré le maintien de la croissance. Ce phénomène est lié aux mesures appliquées dans différents domaines, principalement en matière de politique énergétique et climatique. Le progrès technique et les mutations structurelles y ont aussi contribué. A l'échelle mondiale, les émissions de gaz à effet de serre se sont également stabilisées ces deux dernières années. Il n'est toutefois pas clair s'il s'agit d'un renversement de tendance. Il est, en revanche, évident que les émissions même stabilisées sont bien trop élevées : elles réussiront, en trois décennies environ, à dépenser l'ensemble du budget d'émissions disponible pour ne pas dépasser l'objectif des 2 degrés Celsius avec une probabilité de 66 pour cent.

Le groupe de travail III du GIEC déclare qu'il est essentiel de poser dès aujourd'hui les jalons nécessaires pour renverser la tendance dès le début de son rapport : il souligne que nous prenons aujourd'hui des décisions sur la base desquelles nous consommerons plus ou moins d'énergie et émettrons plus ou moins de CO<sub>2</sub> ces prochaines décennies. Si nous continuons à construire des infrastructures et à acquérir des produits à longue durée de vie dont les besoins en énergie fossile sont élevés ou qui impliquent la consommation de telles énergies, notre société opterait alors pour une voie fortement émettrice de CO<sub>2</sub>, un changement de cap ultérieur serait très onéreux. Si nous souhaitons réduire rapidement les émissions de gaz à effet de serre, la mise en place d'une politique climatique ambitieuse et d'entraves à de telles erreurs d'investissement ne doit plus tarder.

Les erreurs d'investissement les plus graves incluent la construction de centrales au charbon et la prospection pétrolière qui ne sont pas uniquement problématiques pour le climat et l'environnement, mais aussi de plus en plus

sources d'inquiétude pour les investisseurs (BlackRock 2015). On pense ici aux notions d'« actifs échoués » (« Stranded Assets » : actifs qui ont perdu leur valeur marrante tels que les réserves de charbon ou de pétrole) et de « bulle du carbone » (ces actifs sont aujourd'hui en partie surévalués, la plupart des acteurs du marché n'ayant pas encore compris qu'ils n'ont plus le droit d'être exploités) (Leaton et al. 2013 ; IEA 2014). Ces erreurs d'investissement se retrouvent aussi au niveau des infrastructures (raffineries et pipelines par exemple) et des villes (par exemple sous la forme de quartiers mal desservis par les transports publics, de bâtiments anciens mal isolés ou de nouveaux bâtiments aux grandes façades vitrées). Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC insiste sur l'urbanisation qui progresse à grande vitesse dans certaines régions du globe ainsi que sur les nombreuses possibilités de réduction des émissions liées à la planification des villes et des nouveaux quartiers. En Suisse, certaines grandes et petites villes sont des acteurs innovateurs en matière d'efficacité énergétique (« Cités de l'énergie ») et de développement durable. Adrienne Grêt-Regamey et Jean-Louis Scartezzini citent, dans leur article (cf. chap. 3.8 Stratégies urbaines face au changement climatique, p. 186), les principaux facteurs d'émissions de gaz à effet de serre en zone urbaine qui doivent être traités en priorité. Les deux auteurs mettent en évidence l'importance de l'aménagement du territoire et de ses instruments, tant pour s'adapter aux conséquences des changements climatiques que pour limiter les émissions.

De même que l'aménagement du territoire couplé à des directives adaptées peut garantir des bâtiments et des infrastructures pauvres en carbone, l'agriculture, la foresterie et la protection des habitats « naturels » doivent également veiller à ce qu'une population croissante au niveau de vie toujours plus élevé n'émette pas plus de gaz à effet de serre, comme le montrent Carmenza Robledo Abad, Daniel Bretscher et Jens Leifeld (cf. chap. 3.7 Agriculture, foresterie et autres affectations des terres, p. 181).

Le rapport du groupe de travail III insiste sur les changements fondamentaux nécessaires dans la fourniture d'énergie (extraction et transport, production d'électricité et de chaleur), car c'est le secteur qui émet, à l'échelle mondiale,

la plus grande quantité de gaz à effet de serre (35 pour cent en 2010) et qui a le plus largement contribué à l'augmentation des émissions (47 pour cent des 10 gigatonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> supplémentaires en 2010 par rapport à 2000; IPCC 2014/WGIII/SPM). Sans mesures de réduction, les émissions de gaz à effet de serre dans le secteur énergétique pourraient doubler, voire tripler d'ici 2050. Une stabilisation de la température à l'échelle planétaire requiert cependant une réduction de ces émissions d'au moins 90 pour cent. Il va de soi que ce secteur ne produit que peu d'électricité et de chaleur pour couvrir ses propres besoins. Ses émissions de gaz à effet de serre doivent donc être également imputées au secteur industriel et aux foyers comme le démontrent Alexander Wokaun et Christoph Ritz dans leur article (cf. chap. 3.4 Energie, p. 168). Néanmoins, le secteur de la fourniture d'énergie porte une lourde responsabilité en ce qui concerne ses émissions, puisque c'est ici que sont choisies les sources primaires d'énergie et les techniques de conversion. Wokaun et Ritz décrivent les diverses possibilités qui permettraient à ce secteur de réduire ses émissions et qu'il conviendrait de toutes les mobiliser pour atteindre des objectifs d'atténuation ambitieux.

En Suisse, le poids du secteur de l'énergie en matière d'émissions de gaz à effet de serre est moindre grâce à la part élevée réservée à l'hydraulique et au nucléaire. Avec une proportion de 33 pour cent, la circulation est à l'origine de la plus grande partie des émissions de gaz à effet de serre (cf. fig. 3.5, p. 162). En ce qui concerne le transport des personnes notamment, la réduction des émissions n'est pas encore amorcée en raison du comportement individuel (cf. fig. 3.9, p. 165). A l'échelle internationale, le problème est encore plus grave à de nombreux endroits puisque le transport de marchandises poursuit également sa croissance. Il est possible que les émissions de CO<sub>2</sub> doublent d'ici 2050 dans le domaine du transport des personnes et des marchandises en raison d'une augmentation supplémentaire des activités logistiques qui ont, jusqu'ici, plus que contrebalancé l'ensemble des gains d'efficacité sur les véhicules (IPCC 2014/WGIII/Chap.8). A l'inverse des rapports précédents, les auteurs du cinquième Rapport d'évaluation du GIEC considèrent cependant que le secteur des transports recèle un potentiel conséquent pour une réduction des émissions. Pour ce faire toutefois, il sera nécessaire d'appliquer l'ensemble des possibilités offertes par les techniques et les comportements dans le domaine des véhicules, des infrastructures et de l'aménagement du territoire. Dans son article (cf. chap. 3.5 Transports, p. 174), Peter de Haan met en exergue les défis qui s'imposent ici à la Suisse, notamment en ce qui concerne l'aéronautique. Cette dernière est généralement exclue des considérations alors que ses émissions de gaz à effet de serre augmentent fortement et ne peuvent donc plus être négligées.

En Suisse, le secteur industriel et les ménages sont responsables, chacun, de près de 20 pour cent des émissions

de gaz à effet de serre. Pour ce qui est des ménages, elles sont liées en premier lieu au chauffage des bâtiments comme le montre l'article d'Adrienne Grêt-Regamey et de Jean-Louis Scartezzini. Ces problèmes sont déjà bien connus et des solutions ont déjà été appliquées afin de réduire les besoins en énergie des bâtiments (chauffage et appareils). Les résultats sont visibles, mais restent encore très modestes. L'article de Renate Schubert s'intéresse aux raisons (cf. chap. 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement, p. 164). Les changements climatiques pourraient, du reste, baisser de 5 à 21 pour cent les besoins en chauffage de par le monde jusqu'en 2050. Les émissions de CO<sub>2</sub> qui y sont liées réduiraient cependant bien moins. On estime, dans le cas d'un scénario climatique modéré qui réduirait les besoins en chauffage de 15 pour cent, que les émissions de CO<sub>2</sub> ne réduiraient, en Suisse, que de 2,5 pour cent (Winkler et al. 2014). Une partie du problème provient de l'effet de rebond : la réduction des besoins en énergie due aux changements climatiques ou à une meilleure efficacité énergétique des bâtiments, des véhicules ou des appareils est en partie, voire totalement, compensée par une augmentation de la consommation (Jenny et al. 2013). Il convient d'ajouter à cela une hausse des besoins de climatisation en été, qui absorbe en partie la réduction des besoins de chauffage. Dans son deuxième article, Peter de Haan montre que les progrès techniques sont certes importants, mais qu'ils ne suffisent pas pour limiter les émissions de gaz à effet de serre en raison d'une augmentation de la consommation.

Pour conclure, il convient de rappeler que les analyses sectorielles approfondies ne doivent pas occulter le système global : la décarbonisation des transports et de la production de chaleur dans le bâtiment s'accompagnera certainement d'une électrification. Il est ainsi d'autant plus important que la production d'électricité se décarbonise, elle aussi, partout dans le monde et qu'en Suisse, ses émissions de CO<sub>2</sub> soient maintenues à un niveau aussi faible que possible.

## Bibliographie

- BlackRock (2015) *The Price of Climate Change – Global Warming's Impact on Portfolios*. October 2015.
- IEA (2014) *World Energy Investment Outlook. Special Report*. Paris, 190 pp.
- Jenny A, Karlegger A, Montanari D, Ott W, Madlener R (2013) *Massnahmen der Energiestrategie 2050: Begleitende verhaltensökonomische und sozialpsychologische Handlungsempfehlungen*. Sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Econcept, Zurich.
- Leaton J et al. (2013) *Unburnable carbon 2013: wasted capital and stranded assets*. Carbon Tracker and the Grantham Research Institute, London.
- Winkler R, Almer C, Bader C, Gonseth C, Laurant-Lucchetti J, Thalmann P, Vielle M (2014) «*Energy consumption of buildings – direct impacts of a warming climate and rebound effects*». In: CH2014-Impacts (ed.) *Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland*, Bern, Switzerland: OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope, and ProClim, 99–105.

## 3.2 Les tendances des émissions – émissions d'hier et de demain

A l'heure actuelle, la Suisse émet, par habitant et par an, près de six tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> directement sur son territoire. Les principaux responsables en sont la circulation routière pour un tiers et le chauffage des bâtiments pour un quart. Ces émissions annuelles par personne passent à environ 14 tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> si l'on y intègre également les émissions grises, c'est-à-dire celles produites à l'étranger pour les marchandises importées en Suisse. La Suisse se situe ainsi au-dessus de la moyenne mondiale. A l'échelle de la planète, les émissions de gaz à effet de serre ont triplé, voire quadruplé depuis 1950. La croissance démographique et économique actuelle génère chaque année une augmentation des émissions, qu'une meilleure efficacité énergétique ne réussit pas à compenser. Si nous voulons respecter l'objectif des 2 degrés défini par le monde politique, la quantité d'émissions de CO<sub>2</sub> à notre disposition est cependant limitée. Plus nous attendons pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, plus ces émissions devront plus tard réduire rapidement afin d'atteindre cet objectif. La définition des acteurs qui peuvent et doivent y contribuer et l'ampleur de leur contribution relèvent de la répartition des efforts.

### Les tendances mondiales des émissions de gaz à effet de serre

Depuis 1950, les émissions de CO<sub>2</sub> ont presque quadruplé à l'échelle mondiale. Les raisons sont liées à la croissance démographique et économique actuelle (valeur ajoutée par personne) qui sont la cause, chaque année, d'encore plus d'émission. L'amélioration de l'efficacité énergétique (baisse de la consommation d'énergie par franc de valeur ajoutée) s'y oppose, mais ne réussit pas à compenser les effets de la croissance démographique et économique. Après plusieurs décennies de baisse, l'intensité de CO<sub>2</sub> (émission de CO<sub>2</sub> par kilowattheure d'énergie consommée) a de nouveau augmenté en raison de la grande disponibilité de charbon et de gaz bon marché.

*Reto Knutti (EPF de Zurich), Joeri Rogelj (IIASA Laxenburg)*

#### Les émissions de CO<sub>2</sub> augmentent

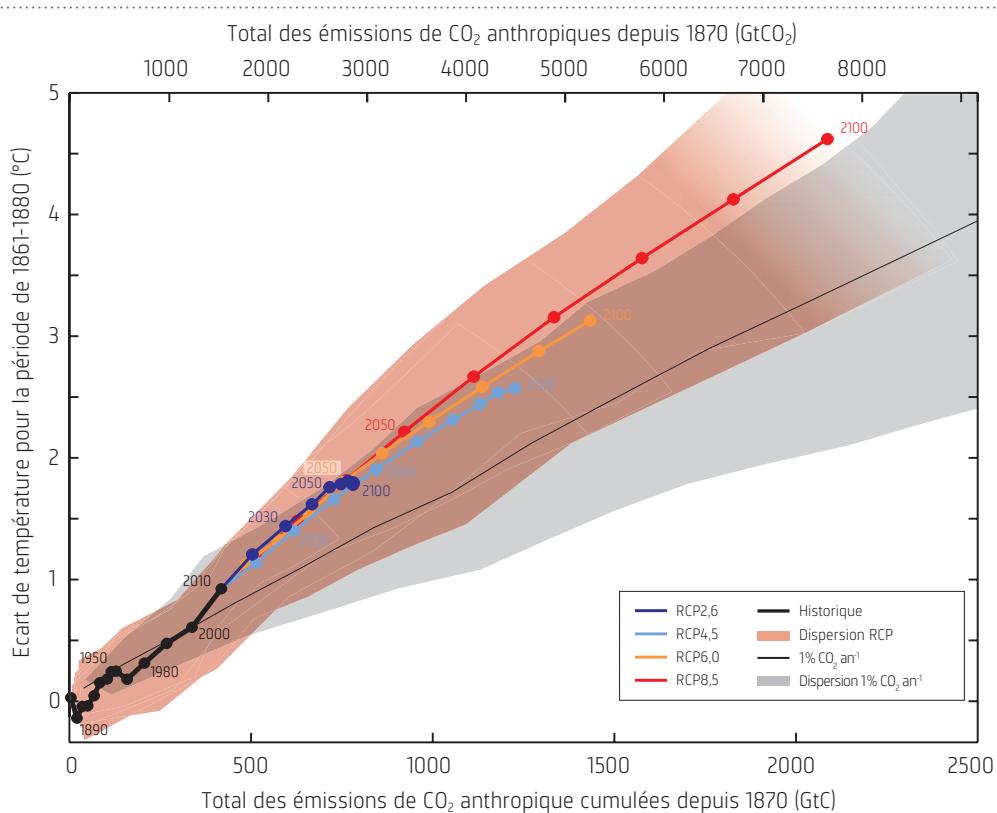
Malgré les négociations internationales et le Protocole de Kyoto, l'augmentation des émissions s'est même accélérée depuis environ 2000: de 1,1 pour cent par an dans les années 1990, elle a atteint 3 pour cent par an (valeur moyenne des années 2000-2013). Il y a deux raisons à cela: une croissance économique qui s'est accélérée depuis 2000 environ, et un renversement de la tendance à l'augmentation de la concentration de CO<sub>2</sub>. Ces deux phénomènes sont en grande partie liés à l'accélération inattendue de la croissance économique dans les pays émergents tels que la Chine en particulier. Matière première bon marché et fiable pour la production d'électricité, le charbon y joue un rôle important. La Chine s'est substituée aux Etats-Unis en première place au palmarès des plus gros émetteurs de CO<sub>2</sub>. Dans la comparaison du taux d'émissions par habitant, la Chine se place loin derrière les Etats-Unis, mais atteint déjà un niveau équivalant à celui de la Suisse et d'autres pays européens.

#### Les combustibles et carburants fossiles sont les plus grandes sources de CO<sub>2</sub>

Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant des combustibles et carburants fossiles (et, pour une petite part, de la production de ciment) dominent l'effet de serre anthropique avec, à l'échelle mondiale, un taux d'environ 65 pour cent (mesuré en équivalent CO<sub>2</sub>) suivi, avec 11 pour cent, par la déforestation et le changement d'affectation des terres. Outre le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>) y contribue à raison de 16 pour cent, le gaz hilarant (N<sub>2</sub>O) de 6 pour cent et les hydrofluorocarbures (fluorocarbures halogénés, hydrocarbures perfluorés et hexafluorure de soufre) de 2 pour cent. L'effet par molécule de ces gaz est certes bien plus élevé que celui du CO<sub>2</sub>, mais leur quantité dans l'atmosphère est bien plus faible.

#### Contribution des secteurs

A l'échelle de la planète, les secteurs suivants contribuent le plus aux émissions de gaz à effet de serre: production d'électricité et de chaleur (25%), agriculture, déforestation et changement d'affectation des sols (24%), industrie (21%), transport (14%) et bâtiments (6%).



**Figure 3.2:** Augmentation moyenne de la température mondiale en fonction de la quantité totale de CO<sub>2</sub> émise. Les résultats présentés ici concernent les modèles couplés du climat et du cycle du carbone pour les quatre scénarios RCP jusqu'en 2100. Les valeurs moyennes sur dix ans sont représentées par des points (2050, p. ex., représente la moyenne après 2040-2049). Les résultats modélisés concernant le passé sont indiqués en noir. La surface rouge représente l'incertitude des modélisations. Les résultats des scénarios incluant uniquement les émissions de CO<sub>2</sub> sont représentés par les fines lignes noires et la surface grise. Pour une certaine quantité de CO<sub>2</sub>, elles indiquent un réchauffement inférieur à celui des scénarios RCP qui prennent également en compte tous les autres facteurs tels que méthane, N<sub>2</sub>O et aérosols. (Source: IPCC 2013/WGI/SPM/Fig.10).

## Le budget CO<sub>2</sub> planétaire

Malgré un grand nombre de rétroactions complexes tant au niveau du système climatique que du cycle du carbone, le rapport entre la température mondiale et les émissions anthropiques de CO<sub>2</sub> est étonnamment simple : l'évolution de la température mondiale est à peu près proportionnelle au total des émissions de CO<sub>2</sub> depuis l'époque pré-industrielle (fig. 3.2). Cette relation linéaire résiste aux changements de modèles de différente complexité, le niveau exact du réchauffement par tonne de CO<sub>2</sub> émise variant cependant selon le modèle. Cette valeur se situe *probablement* (niveau de probabilité supérieur à 66 pour cent) dans une plage comprise entre 0,8 et 2,5 degrés Celsius par 1000 gigatonnes de carbone<sup>1</sup>. Autrement dit, chaque objectif de température correspond à une quantité de CO<sub>2</sub> maximale autorisée. 2 degrés, 1,5 degrés ou 3 degrés Celsius, peu importe : la quantité totale correspondante de CO<sub>2</sub> que nous pouvons émettre est limitée.

Cette idée d'un budget total de CO<sub>2</sub> limité pendant la période jusqu'à l'atteinte de l'objectif de stabilisation de la température souhaité aboutit à des conséquences simples : plus nos émissions sont élevées aujourd'hui, moins elles pourront l'être demain ; plus un pays émet de CO<sub>2</sub>, plus un autre doit réduire ses propres émissions. Dès lors que l'objectif de température fixé est atteint, les émissions mondiales devront pratiquement être nulles pour que cette température reste stable.

## Budget CO<sub>2</sub> pour l'objectif des 2 degrés

Nous disposons d'un budget d'environ 1000 milliards de tonnes de carbone pour atteindre l'objectif des 2 degrés avec une probabilité minimale de 66 pour cent. Ce budget se réfère toutefois uniquement au carbone provenant du CO<sub>2</sub> et néglige les autres substances sources d'émissions telles que le méthane (CH<sub>4</sub>) et le gaz hilarant (N<sub>2</sub>O) provenant notamment de l'agriculture ainsi que l'effet de refroidissement des aérosols. Si elles sont intégrées, ce budget CO<sub>2</sub> se réduit pour atteindre 800 milliards de tonnes

<sup>1</sup> 1 GtC = 1 gigatonne de C =  $10^{15}$  g C = 3,6 Gt CO<sub>2</sub>

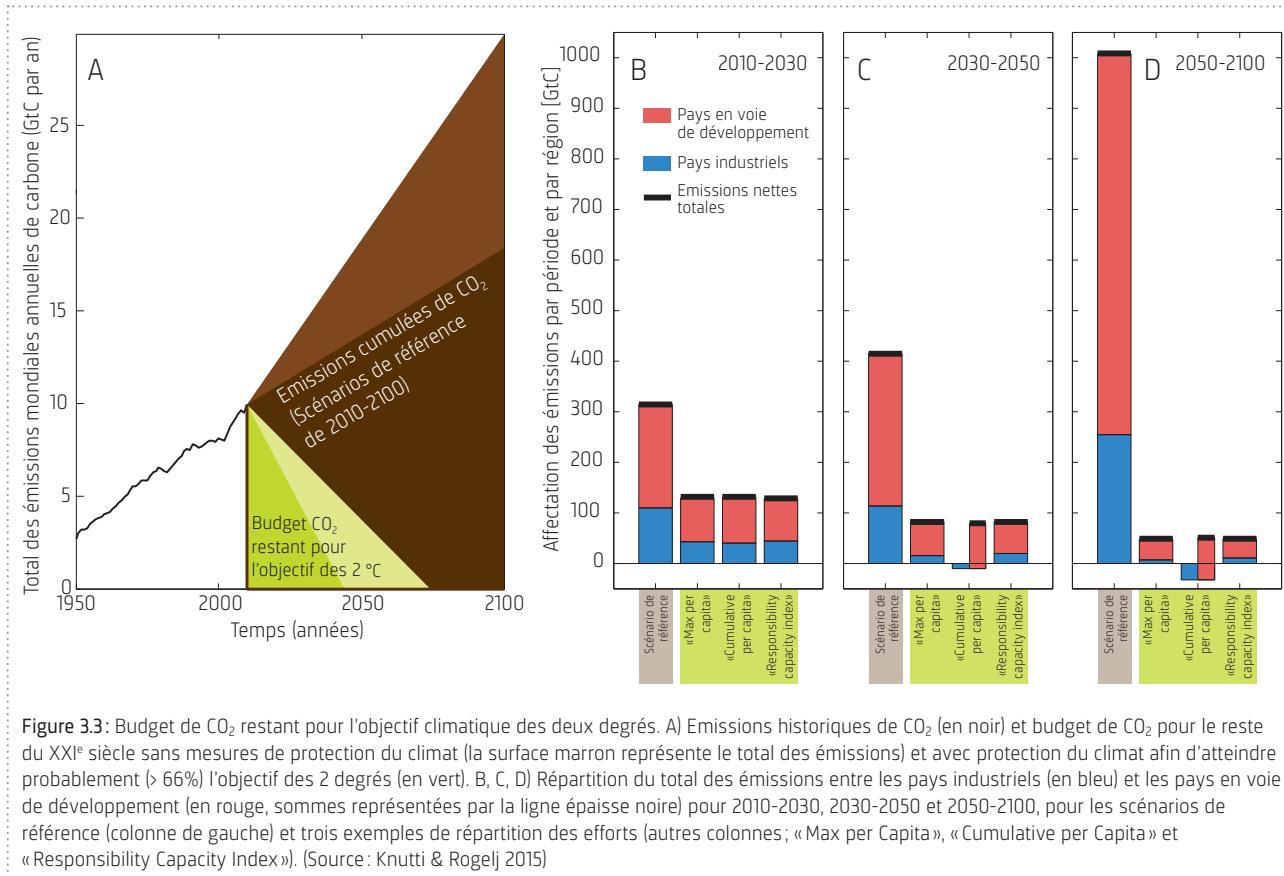


Figure 3.3: Budget de CO<sub>2</sub> restant pour l'objectif climatique des deux degrés. A) Emissions historiques de CO<sub>2</sub> (en noir) et budget de CO<sub>2</sub> pour le reste du XXI<sup>e</sup> siècle sans mesures de protection du climat (la surface marron représente le total des émissions) et avec protection du climat afin d'atteindre probablement (> 66%) l'objectif des 2 degrés (en vert). B, C, D) Répartition du total des émissions entre les pays industriels (en bleu) et les pays en voie de développement (en rouge, sommes représentées par la ligne épaisse noire) pour 2010-2030, 2030-2050 et 2050-2100, pour les scénarios de référence (colonne de gauche) et trois exemples de répartition des efforts (autres colonnes; «Max per Capita», «Cumulative per Capita» et «Responsibility Capacity Index»). (Source: Knutti & Rogelj 2015)

de carbone, dont environ 515 milliards ont déjà été émis depuis l'ère préindustrielle (1870). Il ne nous reste donc plus qu'un tiers du budget total.

Vouloir atteindre l'objectif des 2 degrés avec une probabilité supérieure à 66 pour cent ou ne pas réussir à réduire suffisamment les émissions de méthane et de gaz hilarant provenant de l'agriculture implique une réduction correspondante du budget de CO<sub>2</sub> restant.

## Le problème de la répartition des efforts

La politique internationale a opté pour l'objectif des 2 degrés, en conséquence de quoi il nous reste encore moins d'un tiers du budget total de carbone (cf. ci-dessus). L'accord de Paris évoque également l'objectif supplémentaire d'un réchauffement de 1,5 degré Celsius. Il est associé aux mêmes arguments, le budget total étant cependant encore plus restreint. La manière de répartir ce budget total d'émissions entre les pays et dans le temps est une question éthique et économique à laquelle les sciences naturelles ne peuvent apporter de réponse. En ce qui concerne la répartition entre les pays, les discussions politiques s'appuient fondamentalement sur le principe de «la res-

ponsabilité commune, mais différenciée». Cela signifie, en d'autres termes, que le budget de CO<sub>2</sub> est une ressource mondiale et qu'il ne peut être respecté que si tous les pays participent à la solution. Cela ne signifie cependant pas qu'ils doivent tous y apporter une contribution égale puisque leur responsabilité n'est pas identique. On parle ici de répartition des efforts.<sup>2</sup>

## Modèles de solution

La plupart des approches visant à répartir des efforts abordés lors des négociations sur le changement climatique, tiennent compte de la responsabilité historique d'un pays (émissions historiques et actuelles) en se basant sur le principe du pollueur-paye, selon lequel les coûts liés à une pollution sont à la charge de celui qui en est à l'origine. D'autre part, on analyse souvent si un pays a la possibilité de réduire ses émissions, en s'appuyant, par exemple, sur le produit national brut par habitant. De ma-

<sup>2</sup> L'expression «Burden sharing» (répartition des efforts) désigne l'effort que doit fournir chaque pays, en tenant compte de certains critères d'équité, afin de réduire les émissions. La question parallèle abordée ici concerne la répartition du budget de CO<sub>2</sub>, c'est-à-dire la part des émissions totales de CO<sub>2</sub> qui revient à chaque pays (Knutti & Rogelj 2015).

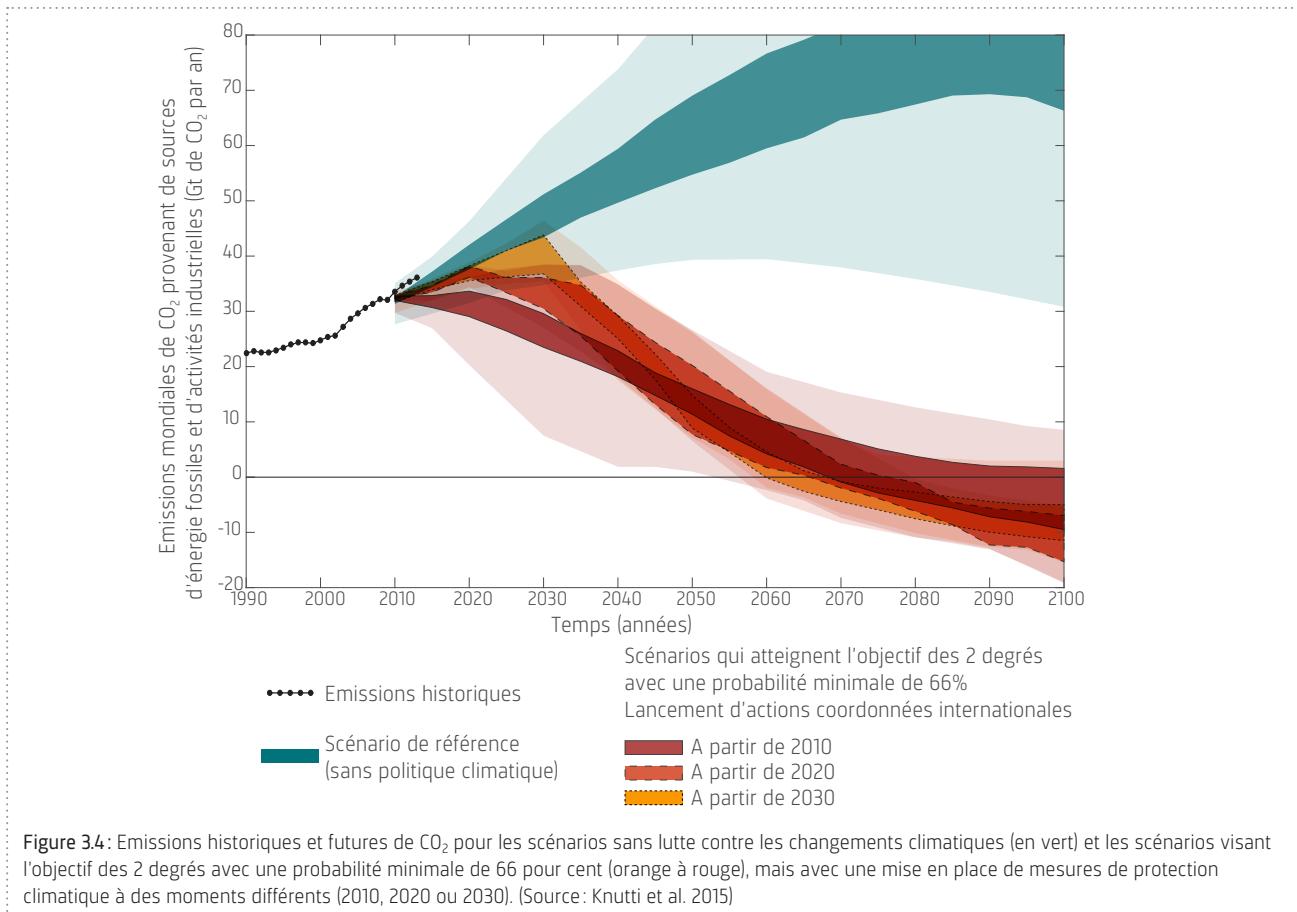


Figure 3.4: Emissions historiques et futures de CO<sub>2</sub> pour les scénarios sans lutte contre les changements climatiques (en vert) et les scénarios visant l'objectif des 2 degrés avec une probabilité minimale de 66 pour cent (orange à rouge), mais avec une mise en place de mesures de protection climatique à des moments différents (2010, 2020 ou 2030). (Source: Knutti et al. 2015)

nière similaire aux impôts, le principe applicable ici indique que chacun doit participer, mais que celui qui possède ou gagne plus peut et doit fournir une plus grande contribution. La figure 3.3 montre la répartition des efforts à l'exemple de l'objectif des 2 degrés et sur la base des trois modèles de solution abordés en priorité, d'autres étant cependant également possibles :

- «**Max per Capita**» : les émissions par tête des pays en voie de développement restent inférieures aux émissions par tête des pays industriels.
- «**Cumulative per Capita**» : les émissions par tête cumulées des pays industriels et des pays en voie de développement restent identiques entre 1990 et la fin du XXI<sup>e</sup> siècle.
- «**Responsibility Capacity Index**» : les émissions sont réparties entre les pays conformément à leurs émissions historiques et à leur produit national brut.

A court terme, ces trois approches visant à répartir les efforts sont similaires. A long terme cependant, les émissions des pays industriels devraient être négatives dans le cas du modèle «Cumulative per Capita». Un pays peut atteindre des émissions négatives en achetant, par exemple, des certificats, le prix d'achat correspondant à une écono-

mie d'émissions à l'étranger. Il est également possible de combiner la bioénergie avec la séquestration du CO<sub>2</sub>: le CO<sub>2</sub> atmosphérique est capté et stocké dans le sol. Ces trois modèles de solution ont en commun que les pays générant aujourd'hui le plus d'émissions devront les réduire le plus fortement et que la plus grande partie du budget restant est attribué aux pays en voie de développement.

Alors que le monde politique en parle depuis longtemps, les pays n'ont pas encore réussi, jusqu'à présent, à se mettre d'accord sur une solution pour la répartition des efforts. Par exemple, la question suivante reste ouverte: les habitants d'un pays sont-ils uniquement responsables des émissions actuelles ou également des émissions des générations précédentes? Le principe de la répartition du budget est critiqué par certains comme étant politiquement inapplicable. D'autres avancent qu'il n'existe aucun «droit de polluer» à partager. Dans une variante, un droit au développement ou à la qualité de vie serait, par exemple, envisageable. Son calcul et ses liens avec les émissions historiques et actuelles sont cependant encore plus subjectifs. En 2015, les pays ont décidé, à Paris, de limiter le réchauffement du système climatique mondial à une hausse clairement inférieure à 2 degrés Celsius, et dans la mesure du possible à 1,5 de-

grés Celsius. Ces objectifs doivent être atteints grâce à une contribution au niveau des pays : chaque pays participant va probablement proposer une contribution qu'il estime équitable. Jusqu'à présent, la somme de ces contributions ne suffit pas pour atteindre l'objectif des 2 degrés ou 1,5 degrés. Une autre vision consiste à considérer qu'il est peu probable de pouvoir résoudre le problème de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par une discussion sur la répartition des efforts ni par un accord international, mais plutôt par la mise en place de conditions-cadre qui rendraient la décarbonisation si attrayante pour les particuliers, les entreprises ou les pays qu'elle progresserait indépendamment des actions des autres participants (Patt 2015).

## Le temps manque pour la décarbonisation

Les modèles d'évaluation intégrée (cf. chap. 1.4 Les modèles climatiques, p. 36) permettent de calculer les profils de CO<sub>2</sub> les plus économiques pour un budget de CO<sub>2</sub> ou un objectif climatique donné (fig. 3.4). Ils prennent également en compte les incertitudes en matière d'émission d'autres gaz à effet de serre et d'évolution de la technique et de la société, par exemple, de la disponibilité ou non de l'énergie nucléaire dans le futur. La figure 3.4 montre que les émissions actuelles se placent dans la plage supérieure des scénarios de référence sans protection climatique et, ainsi, bien au-dessus des scénarios rentables pour atteindre l'objectif des 2 degrés, ces scénarios démarrant la baisse nette des émissions dès 2010 (fig. 3.4, rouge foncé).

Ce schéma met en évidence que plus nous attendons pour mettre en place des mesures de réduction des émissions de gaz à effet de serre, plus le rythme de réduction des émissions devra s'accélérer ou, après 2060 par exemple, plus les émissions devront devenir négatives si nous souhaitons atteindre un certain objectif de température. Ainsi, l'objectif des 2 degrés ne paraît que très difficilement réalisable si nous ne freinons pas la croissance des émissions de CO<sub>2</sub> au cours des cinq prochaines années, sans même évoquer l'objectif des 1,5 degrés. Même si certains pays voulaient atteindre leurs objectifs volontaires d'émissions d'ici 2020, un renversement de tendance devrait s'opérer en matière d'efficacité énergétique et de réduction de l'intensité de CO<sub>2</sub>. Dans les scénarios économiquement rentables, la réduction nécessaire des émissions entre 2030 et 2050 atteint environ trois pour cent par an. Elle passe à environ cinq pour cent par an dans les scénarios qui partent du principe que les mesures de protection du climat annoncées jusqu'à présent seront effectivement mises en place d'ici 2030. Les scénarios qui supposent que les tendances actuelles se poursuivront jusqu'en 2030 exigent une réduction annuelle des émissions de CO<sub>2</sub> de 6 pour cent. Il est ainsi évident que chaque année supplémentaire qui passe sans prise de mesures globales et internationales de pro-

tection du climat amenuise les possibilités de maintenir l'augmentation de la température mondiale en dessous des deux degrés Celsius.

## Les engagements volontaires des pays sont insuffisants

Dans les scénarios économiquement rentables pour l'objectif des 2 degrés, les émissions des pays industrialisés en 2030 sont inférieures de 20 à 40 pour cent à celle de 2010 (IPCC 2014/WG III/Tab.6.4) A l'échelle de la planète, une réduction de 40 à 70 pour cent serait nécessaire jusqu'en 2050 pour atteindre l'objectif des 2 degrés, ce qui implique, pour les pays industrialisés, une réduction de leurs émissions de 80 à plus de 90 pour cent en 2050 par rapport à 2010. Ces chiffres s'appliquent pour une grande partie des approches visant à répartir les efforts (IPCC 2014/WGIII/ Fig.6-29). Dans de nombreux scénarios, les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> deviennent négatives en 2070. En d'autres termes, la quantité de CO<sub>2</sub> stockée par la bioénergie et la séquestration doit dépasser les émissions.

Les engagements volontaires des différents pays sont nettement inférieurs aux réductions nécessaires pour atteindre de manière économiquement rentable l'objectif des 2 degrés comme indiqué dans les figures 3.3 et 3.4 (Rogelj et al. 2016). Malgré toutes les négociations sur la lutte contre les changements climatiques, la communauté internationale est loin d'atteindre l'objectif des 2 degrés, mais vise plutôt à lutter contre un réchauffement de 3 à 4 degrés Celsius (Schaeffer et al. 2013).

## Bibliographie

- IPCC (2013) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. Chapter 6 «Assessing Transformation Pathways». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Knutti R, Rogelj J (2015) *The legacy of our CO<sub>2</sub> emissions: a clash of scientific facts, politics and ethics*. Climatic Change 133: 361–373.
- Knutti R, Rogelj J, Sedláček J, Fischer EM (2016) *A scientific critique of the two-degree climate change target*. Nature Geoscience 9: 13–18.
- Patt A (2015) *Transforming Energy: Solving Climate Change with Technology Policy*. University Press, Cambridge.
- Rogelj J, den Elzen M, Höhne N, Fransen T, Fekete H, Winkler H, Schaeffer R, Sha F, Riahi K, Meinshausen M (2016) *Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2°C*. Nature 534: 631–639.
- Schaeffer M, Gohar LK, Kriegler E, Lowe JA, Riahi K, Van Vuuren DP (2013) *Mid- and long-term climate projections for fragmented and delayed-action scenarios*. Technological Forecasting & Social Change 90: 257–268.

## Les tendances nationales d'émissions de gaz à effet de serre

Dans le cadre de la convention des Nations unies sur le climat et du Protocole de Kyoto, la Suisse a mis en place un inventaire national sur les gaz à effet de serre afin d'enregistrer systématiquement ses propres émissions. Ce recensement applique des laines directrices méthodologique normalisées et concerne les émissions produites sur le territoire suisse depuis 1990, ces données étant actualisées chaque année.

*Regine Röthlisberger (OFEV)*

### Les émissions actuelles

La Suisse émet environ 6 t d'équivalents CO<sub>2</sub> par tête et par an directement sur son territoire. Ce chiffre passe à environ 14 tonnes si l'on y intègre également les émissions grises<sup>3</sup>. Il se situe ainsi au-dessus de la moyenne mondiale. Grâce à la part élevée de l'hydraulique et du nucléaire dans la production d'électricité, les émissions de CO<sub>2</sub> de la Suisse sont cependant inférieures à celles de nombreux autres pays européens.

Trois quarts des émissions de gaz à effet de serre proviennent, en Suisse, de l'utilisation d'agents énergétiques fossiles, principalement de mazout, de gaz naturel, de carburant Diesel et d'essence. Ce total ne prend pas en compte les émissions dues à l'aviation internationale, qui sont répertoriées séparément. Si elles l'étaient, il conviendrait d'y ajouter près de 10 pour cent.

Si l'on analyse les émissions de gaz à effet de serre en Suisse en les répertoriant par secteur (fig. 3.5), on constate que la circulation routière (33%) et le chauffage des bâtiments (24% dont 16% pour les ménages et 8% pour les services) sont les deux principaux responsables. Le secteur industriel est à l'origine de 15 pour cent supplémentaires dont 10 pour cent pour la consommation d'énergie et 5 pour cent pour les processus industriels (on citera ici, en particulier, les émissions géogènes de CO<sub>2</sub> dues à la production de ciment). Il est suivi par l'agriculture (émissions de méthane dues à l'élevage animal et émissions de gaz hilarant provenant des sols exploités) avec environ 14 pour cent ainsi que la conversion d'énergie (électricité et chaleur à distance, principalement par les usines d'incinération des ordures ménagères, et les raffineries) avec 8 pour cent. Quatre pour cent du total des émissions proviennent de l'utilisation de gaz fluorés, généralement liés aux fluides frigorigènes. Les deux pour cent restants sont dus à la gestion des déchets (eaux usées, décharges, production de biogaz).

### Scénarios d'émissions

Un modèle d'équilibre économétrique<sup>4</sup> a permis d'évaluer l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en Suisse jusqu'en 2030 en tenant compte des mesures de politique climatique actuellement en vigueur (cf. chap. 4.2 La politique climatique suisse, p. 194) et l'évolution qu'elles auraient connu si aucune mesure de lutte contre les changements climatiques n'avait été mise en place. Cette étude a, par ailleurs, estimé les effets que rendrait possibles un durcissement futur de la politique climatique, ainsi que l'évolution des émissions de gaz à effet de serre en supposant l'application de mesures supplémentaires ou renforcées (fig. 3.6):

- **Scénario élevé sans mesures (WOM: «without measures»):** malgré une augmentation forte de la population, de la surface habitée et du produit intérieur brut depuis 1990, le total des émissions de gaz à effet de serre n'aurait que légèrement dépassé le niveau de 1990 grâce au progrès technique et malgré l'absence de mesures de lutte contre les changements climatiques.
- **Scénario intermédiaire avec les mesures actuellement en vigueur (WEM: «with existing measures»):** les mesures de lutte contre les changements climatiques actuellement en vigueur permettent une réduction de près de 20 pour cent du total des émissions de gaz à effet de serre jusqu'en 2030 et par rapport au niveau de 1990.
- **Scénario inférieur avec un durcissement supplémentaire des mesures (WAM: «with additional measures»):** le scénario impliquant des mesures supplémentaires et renforcées de lutte contre le réchauffement du système climatique permettrait, jusqu'en 2030, une réduction du total des émissions de gaz à effet de serre de près de 30 pour cent par rapport à 1990.

<sup>3</sup> Les émissions occasionnées à l'étranger par les marchandises importées en Suisse.

<sup>4</sup> Ce modèle permet de représenter l'économie dans son intégralité et d'étudier un état d'équilibre économique national ([gemini-e3.epfl.ch](http://gemini-e3.epfl.ch)).

Emissions de gaz à effet de serre en Suisse 2014

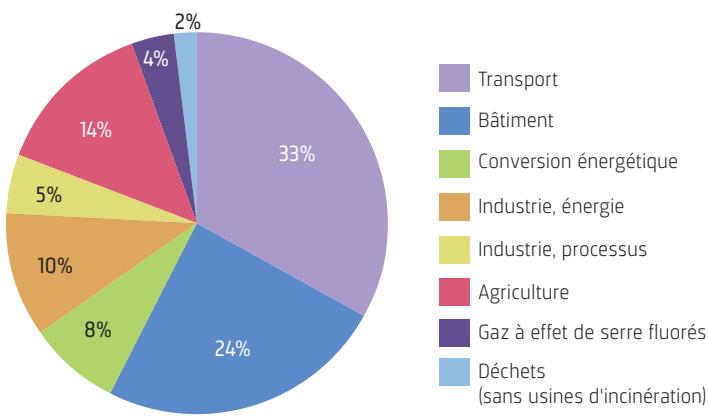


Figure 3.5: Répartition des émissions de gaz à effet de serre en Suisse selon les secteurs en 2014. (Source: OFEV 2016)

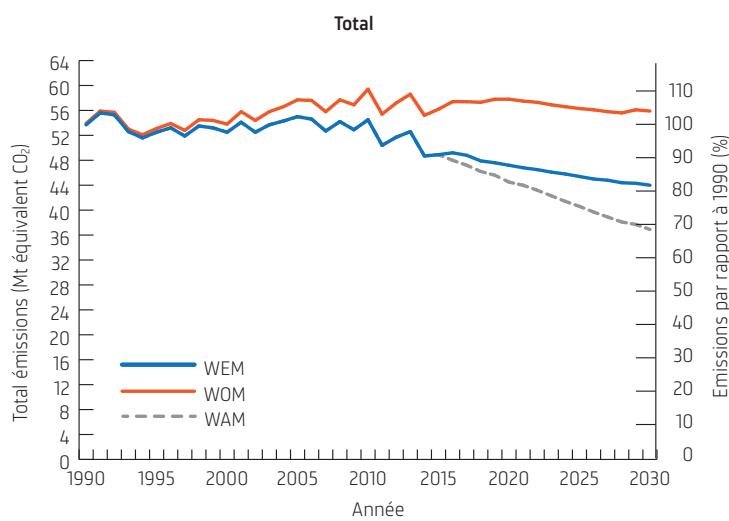


Figure 3.6: Scénarios d'émissions pour la Suisse (gaz à effet de serre tous traduits en équivalent CO<sub>2</sub>). La figure montre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre dans les trois différents scénarios: scénario sans mesures de lutte contre le réchauffement du système climatique (WOM: «without measures»), scénario impliquant les mesures actuellement en vigueur (WEM: «with existing measures») et scénario prévoyant un durcissement supplémentaire des mesures (WAM: «with additional measures»). (Source: EPFL & INFRAS 2016; OFEV 2016)

en fonction du scénario, car les transports, le bâtiment, la conversion énergétique et l'industrie évoluent différemment.

#### Le secteur du bâtiment

Dans le secteur du bâtiment, tous les scénarios supposent une réduction sensible des émissions jusqu'en 2030. L'utilisation de sources d'énergie renouvelables ainsi que les différentes mesures permettant d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments sont aujourd'hui déjà arrivées à maturité; elles sont mises en place au fur et à mesure et permettent (en particulier grâce au remplacement des systèmes de chauffage à énergie fossile et à l'amélioration de l'enveloppe des bâtiments) d'atteindre, jusqu'en 2030, des réductions d'émissions de 40 à 60 pour cent dans les scénarios WEM et WAM. Même dans le scénario sans mesures politiques (WOM), le progrès technique permet à lui seul de réduire les émissions, à un rythme cependant nettement inférieur par rapport aux scénarios impliquant la mise en place de mesures de politique climatique et énergétique (fig. 3.7).

#### Le secteur des transports

L'augmentation des déplacements absorbe largement les gains d'efficacité rendus possibles par le progrès technique. Dans le scénario sans mesures politiques (WOM), les émissions de 2030 restent également supérieures à celles de 1990. Dans le scénario impliquant les mesures actuellement en vigueur (WEM), l'utilisation de véhicules efficaces est accélérée par la mise en place de mesures et implique des émissions à peu près égales au niveau de 1990. Seul un durcissement supplémentaire des mesures (scénario WAM) permet d'atteindre une réduction maximale des émissions de dix pour cent sous le niveau de 1990, et ce malgré une augmentation des déplacements jusqu'en 2030 (fig. 3.8).

#### Les secteurs de l'industrie et de l'agriculture

La part de l'industrie (émissions liées à la consommation d'énergie et aux processus industriels) reste stable. En revanche, celle des émissions agricoles augmente légèrement jusqu'en 2030. En chiffre absolu, les émissions régressent légèrement.

## L'évolution des émissions dans les secteurs transports et bâtiment

La part des secteurs transports et bâtiment dans le total des émissions a connu une évolution contraire depuis 1990: alors que les transports ont enregistré une légère augmentation, les émissions du bâtiment ont baissé. Jusqu'en 2030, la part des différents secteurs continuera à changer

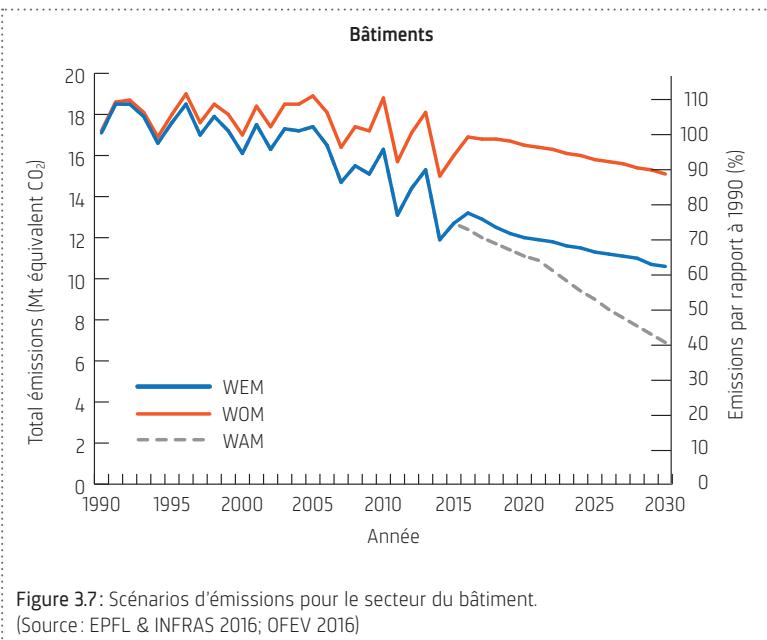


Figure 3.7: Scénarios d'émissions pour le secteur du bâtiment.  
(Source: EPFL & INFRAS 2016; OFEV 2016)

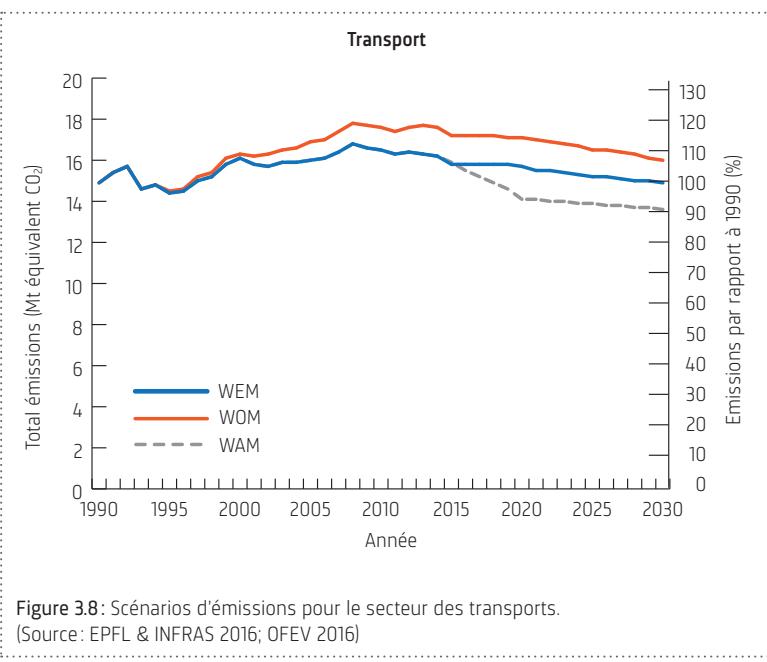


Figure 3.8: Scénarios d'émissions pour le secteur des transports.  
(Source: EPFL & INFRAS 2016; OFEV 2016)

## Bibliographie

EPFL, INFRAS (2016) **Emissions scenarios without measures 1990–2030.**  
Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Zurich &  
Lausanne, 4 May.

OFEV (2016) **Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2014.** Federal  
Office for the Environment (FOEN), Bern.  
[www.climatereporting.ch](http://www.climatereporting.ch)

### 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement

L'économie a beaucoup investi, ces dernières années, dans les mesures de réduction des émissions. En revanche, les rejets de gaz à effet de serre des ménages n'ont pratiquement pas diminué en Suisse pendant les deux décennies passées. La baisse des émissions dans le domaine du chauffage est contrebalancée par une augmentation dans les transports individuels. Les ménages, transports privés inclus, sont responsables d'un bon tiers des émissions totales. Cette stagnation des émissions tient en partie à des conditions-cadres économiques et institutionnelles ainsi qu'à des obstacles psychologiques et sociaux. La connaissance de ces facteurs offre des angles d'approche à la planification de mesures destinées à promouvoir de futurs changements de comportement des ménages.

Renate Schubert (EPF de Zurich)

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC sur l'état du savoir, en particulier la partie du groupe de travail III, parue en avril 2014 (IPCC 2014), relève qu'une augmentation de l'efficacité énergétique dans les transports, l'industrie et les bâtiments revêt une importance capitale pour la limitation mondiale des émissions de gaz à effet de serre. Outre des progrès techniques, des changements de comportement – notamment de la part des acteurs privés – sont indispensables; ils permettraient d'abaisser la demande énergétique de 20 pour cent à court terme et de 50 pour cent jusqu'en 2050 et apporteraient ainsi une importante contribution à la réduction des émissions. Mais les auteurs constatent aussi qu'il est difficile d'obtenir ces changements, car les individus s'en tiennent volontiers au statu quo et sont rarement motivés par des considérations à long terme. C'est pourquoi des incitations monétaires et non monétaires, de même qu'une meilleure information, sont primordiales pour faire évoluer les comportements.

De telles considérations sont importantes aussi pour la Suisse. Les ménages causent environ 35 pour cent des émissions de gaz à effet de serre de la Suisse: à peu près 20 pour cent proviennent des ménages proprement dits et environ 15 pour cent des transports privés (OFS 2014). Pendant les deux dernières décennies, les émissions dues aux transports ont fortement augmenté, tandis que celles attribuables au chauffage ont diminué (fig. 3.9). Si les émissions augmentaient moins fortement à l'avenir dans les transports, ou si celles du chauffage diminuaient de façon plus marquée, la somme des émissions du secteur des ménages baisserait, en dépit de la hausse de la population résidente. Cependant, plusieurs obstacles entravent une telle évolution.

#### Obstacles économiques et institutionnels

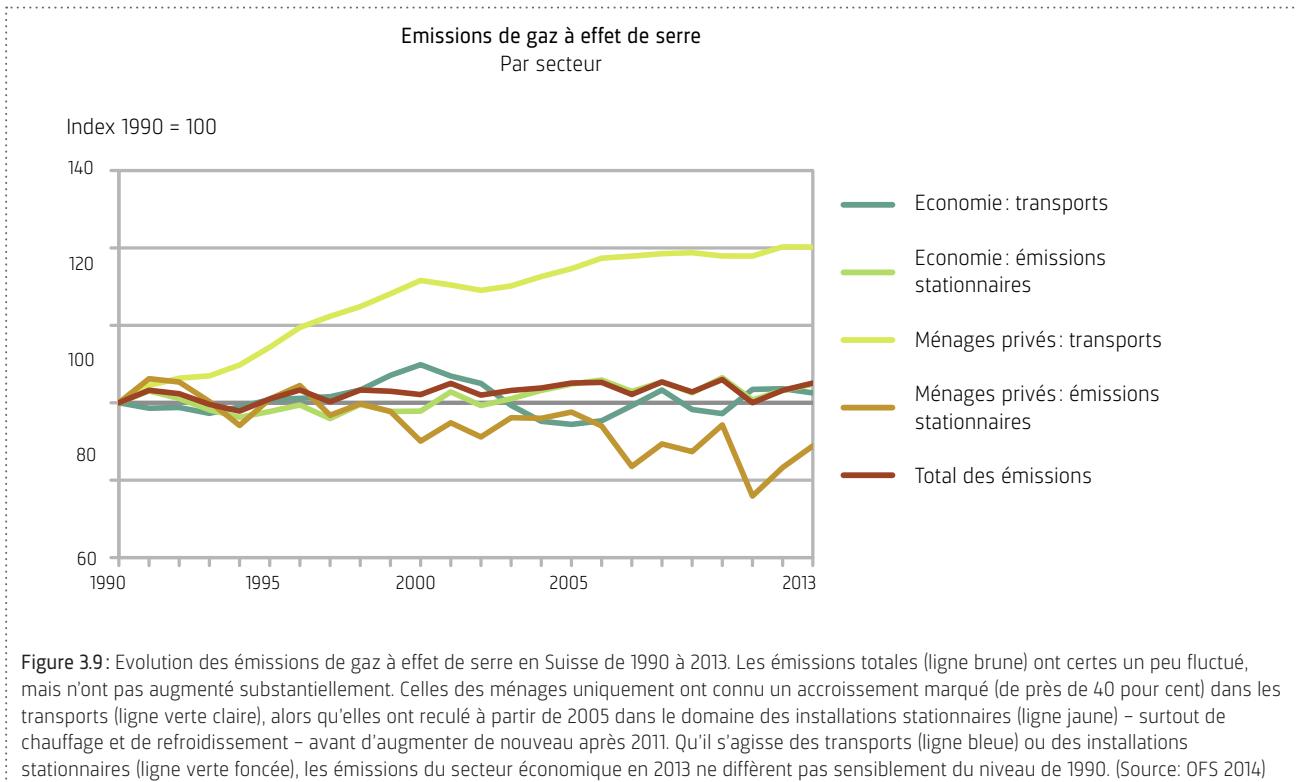
##### Obstacles financiers

Les ménages sont peu incités financièrement à changer leur comportement à l'égard des agents énergétiques fossiles: en effet, les prix de ces combustibles sont plutôt bas et les dommages provoqués par les émissions de gaz à effet de serre, les coûts externes, ne sont pas pris en compte. En outre, les installations qui font appel aux énergies renouvelables, par exemple les voitures électriques ou les chauffages géothermiques, sont encore relativement chères; et dans de nombreux cas, elles sont moins rentables que les installations recourant aux énergies fossiles.

Une autre raison qui empêche souvent les ménages de réduire leurs émissions est qu'ils n'ont pas les moyens financiers pour faire les investissements nécessaires. La transformation du système de chauffage d'une maison individuelle, par exemple le remplacement d'un chauffage à mazout qui dégage beaucoup de gaz à effet de serre par une installation géothermique qui en émet peu, représente un investissement qui dépasse les moyens de nombreux ménages; il en va de même de la pose d'une installation solaire.

##### Conditions-cadres institutionnelles

A part de tels aspects économiques, des *conditions-cadres institutionnelles* ont également empêché jusqu'ici les consommatrices et consommateurs suisses de réduire plus résolument leurs émissions de gaz à effet de serre (Schubert 2013). De nombreux ménages suisses sont locataires, et non pas propriétaires de leurs logements et maisons, et n'ont pas voix au chapitre lors du choix des systèmes de chauffage ou de climatisation ou pour l'isolation des bâtiments. Or, beaucoup de propriétaires se préoccupent surtout du prix d'achat des installations et sont



donc peu motivés à passer à des installations produisant peu d'émissions, à isoler les bâtiments ou à prévoir de telles améliorations pour les nouveaux immeubles.

## Instruments politiques

Les acteurs politiques ont différentes possibilités d'encourager la réduction des émissions. En Suisse, de tels moyens sont mis en œuvre avant tout dans le secteur économique; tel est le cas, par exemple, de la redevance sur le trafic des poids lourds lié aux prestations (RPLP), du système d'échange de quotas d'émission et de la taxe sur le CO<sub>2</sub> prélevée sur les combustibles fossiles. En revanche, dans le plus important domaine problématique, les transports privés, des mesures efficaces font défaut jusqu'à ce jour en raison d'un manque d'acceptation au niveau politique. Par exemple, il n'y a toujours pas de taxe sur le CO<sub>2</sub> prélevée sur les carburants. Des normes techniques ont été adoptées jusqu'ici plutôt avec retenue. L'information écologique donnée lors de l'achat d'une voiture est centrée sur des classes d'efficacité énergétique qui caractérisent la consommation de carburant relative par rapport au poids du véhicule, et non pas la consommation absolue. Ces dernières années, l'effet des améliorations techniques de l'efficacité des véhicules a été plus que neutralisé par l'utilisation de voitures plus grosses

et plus lourdes. En Suisse, un argument souvent avancé à l'encontre des instruments politiques est qu'ils défavoriseraient des régions rurales reculées ou de montagne. On presume que celles-ci sont dépendantes des transports individuels. Une demande de carburant plus élevée dans ces régions n'est toutefois pas démontrée.

## Obstacles psychologiques et sociaux

### Ignorance et perception faussée

Aux conditions-cadres économiques et institutionnelles, s'ajoutent des barrières psychologiques et des entraves sociales qui empêchent que des efforts plus importants soient entrepris pour réduire les émissions individuelles de gaz à effet de serre. D'une part, de nombreux ménages *ignorent* dans quelle mesure leur comportement contribue à ces émissions et comment ils pourraient les réduire efficacement. De fait, ils mènent rarement une réflexion sur les conséquences de leur style de vie. La réserve que suscitent en Suisse les campagnes d'information destinées à promouvoir une telle réflexion en est peut-être une raison. D'autre part, la *perception* de nombreux ménages est souvent faussée en ce sens qu'ils ne font pas le rapport entre leur propre comportement et le danger du changement climatique. Pour eux, ce danger est quelque chose

de très abstrait et de très lointain dans l'espace et dans le temps et n'est donc pas particulièrement menaçant (Attari et al. 2010). C'est pourquoi ils ne voient pas de raisons immédiates de se faire du souci pour l'environnement et ne sont pas incités moralement à agir. Ce qui pourrait constituer la base de leur engagement fait ainsi défaut (Lindenberg & Steg 2007).

## Normes sociales

*L'incertitude* au sujet des futures conditions-cadres semble également faire obstacle à des changements de comportement. Des normes sociales, c'est-à-dire la manière de se comporter des autres personnes et ménages, joue un rôle important dans ce contexte. Tant qu'ils ne sont pas sûrs que les autres font aussi des efforts pour réduire leurs émissions, les individus semblent peu enclins à payer de leur personne pour changer de comportement – par exemple à troquer la voiture pour les transports en commun – ou à assumer les coûts monétaires que cela implique (Devine-Wright 2010). Des normes sociales – se traduisant aussi par le fait qu'un grand nombre de personnes font des efforts pour limiter le changement climatique ou que cet engagement est reconnu dans le cercle des amis ou dans les réseaux sociaux – renforcent la disposition à s'investir pour réduire les émissions. Des célébrités qui adhèrent à cet engagement peuvent jouer ici un rôle important de modèles (Abrahamse & Steg 2009).

## Effets rebonds

L'ampleur des économies d'énergie et d'émissions est influencée en outre par ce qu'on appelle des *effets rebonds*. Ils consistent en ce que des économies monétaires réalisées d'un côté sont contrebalancées ou même surcompensées ailleurs par une augmentation de la consommation (Gillingham et al. 2013). Un exemple: avec l'argent économisé grâce à un chauffage plus efficace, des ménages s'offrent un voyage supplémentaire à l'étranger, ce qui va à l'encontre des réductions d'émission qu'ils ont réalisées précédemment. De telles rétrogradations à la suite d'actions de réduction des émissions peuvent avoir différentes causes. De nombreuses personnes ont une sorte de budget individuel pour leurs efforts en matière de durabilité. Si elles les accroissent dans un domaine donné, elles les réduisent dans d'autres secteurs: au total, le budget est équilibré (Khan & Dhar 2006). Le concept de «finite pool of worry» entre également dans ce contexte (Weber 2006). Il énonce que le nombre de changements de comportement déclenchés par des préoccupations, par exemple au sujet du changement climatique, est limité. Ainsi les émissions totales d'une personne peuvent fort bien aug-

menter en dépit des réductions réalisées pour certaines de ses activités.

## Le bien-être immédiat a la priorité

Une autre entrave aux réductions d'émission des ménages tient au fait que de nombreuses personnes donnent la préférence à leur bien-être présent ou immédiat et n'agissent pas en fonction de ce que pourrait être leur sort, ou celui de leurs enfants ou petits-enfants, dans un avenir lointain. Des taux d'escampe élevés, que l'on observe d'ailleurs surtout en cas d'incertitude et de bas revenu, ont pour effet que des réductions d'émission ainsi que les coûts personnels et monétaires associés sont renvoyés à un avenir indéterminé (Greene 2011). Un tel report est aussi fréquemment l'expression d'une *aversion au risque*. Les individus reculent par crainte des pertes – or, les réductions d'émission sont souvent perçues comme telles: les coûts présents des changements de comportement sont mis en balance avec des revenus incertains qui, de toute manière, ne seront perçus que dans l'avenir.

## Approches pour réduire ces barrières

Que pourrait-on faire pour que davantage de ménages en Suisse abaissent leurs émissions de gaz à effet de serre? Etant donné le rôle très important joué par les aspects économiques, il semble inéluctable de donner un prix aux émissions, c'est-à-dire de taxer plus fort les énergies fossiles – aussi les carburants – et de modifier les conditions-cadres institutionnelles de manière à créer de véritables incitations à réduire les émissions.

En plus de l'appel à des actions volontaires, des mesures de politique énergétique sont nécessaires. Elles obtiennent en général leur plus haut degré d'acceptation qu'elles sont ressenties comme équitables, lorsqu'elles tendent à accroître plutôt qu'à diminuer la liberté de choix des personnes qui s'impliquent, qu'elles mettent l'accent sur plus d'efficacité au lieu d'exiger des renoncements et qu'elles visent à réduire la consommation d'énergie au niveau domestique plutôt que dans les transports (Steg 2008). Ce dernier point confirme que pour réduire les émissions dues aux transports, on ne peut guère miser sur le comportement individuel, mais qu'il faut recourir à des normes techniques et à des incitations financières tangibles (telles que la taxe sur le CO<sub>2</sub>).

Il serait de plus utile que les ménages disposent de plus nombreux retours d'information sur leurs émissions (par exemple par une empreinte carbone obligatoire) et d'une plus large base de connaissances, comme des données sur la consommation d'énergie des produits et des maisons

ou appartements. Des informations sur les systèmes domestiques de mesure de la consommation énergétique seraient également bienvenues. De vastes campagnes d'information remédieraient au manque de connaissances et augmenteraient la prise de conscience. Les entreprises notamment pourraient jouer un rôle important en fournisant des informations à leurs collaboratrices et collaborateurs et en leur proposant des mesures concrètes. De tels programmes d'entreprise auraient l'avantage de mettre en évidence le fait que d'autres personnes agissent également. Ceci pourrait accroître sensiblement la disposition à assumer des coûts en rapport avec les réductions d'émission.

Un effet similaire pourrait être obtenu en misant sur la dynamique des réseaux sociaux fréquentés et importants pour les individus concernés. Ces réseaux serviraient peut-être de levier pour faire sauter les limites étroites des budgets individuels en matière de durabilité. Ils pourraient aussi accélérer des changements du style de vie, par exemple par davantage de « j'aime » pour un comportement énergétique efficace, des actions de covoiturage ou d'autres initiatives de ce genre.

Les mesures d'encouragement à l'efficacité énergétique devraient être accompagnées d'une information sur le risque de contrebalancer ces efforts par une augmentation de la consommation ou du confort dans d'autres domaines (effet rebond). Cet avertissement doit faire comprendre aux individus que leurs efforts n'atteindront pas l'objectif visé, à savoir la réduction des émissions, s'ils les annihilent par de nouvelles activités dans un autre domaine. La mise en évidence de telles contradictions entre les intentions d'une personne et le résultat effectif de ses actes ainsi que de voies permettant de les résoudre s'est révélée très efficace pour promouvoir le respect de l'environnement dans les activités humaines. En outre, la définition d'objectifs concrets (par exemple « réduction de 20 pour cent de la consommation d'électricité »), l'échange d'expériences direct avec des personnes qui ont entrepris avec succès des activités de réduction, ou encore l'affichage de notes de rappel (« Merci d'éteindre la lumière en sortant ») sont des moyens qui ont fait leur preuve pour soutenir les efforts individuels (Osbaldiston & Schott 2012).

## Bibliographie

- Abrahamse W, Steg L (2009) **How do socio-demographic and psychological factors relate to households' direct and indirect energy use and savings?** Journal of Economic Psychology 30: 711–720.
- Attari SZ, DeKay ML, Davidson CI, de Bruin WB (2010) **Public perceptions of energy consumption and savings.** PNAS 107: 16054–16059.
- Devine-Wright P (2010) (ed.) **Renewable energy and the public – From NIMBY to participation.** Earthscan, London.
- Gillingham K, Kotchen MJ, Rapson DS, Wagner G (2013) **The rebound effect is overplayed.** Nature 493: 475–476.
- Greene DL (2011) **Uncertainty, loss aversion, and markets for energy efficiency.** Energy Economics 33: 608–616.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** www.ipcc.ch/report/ar5/wg3
- Khan U, Dhar R (2006) **Licensing effect in consumer choice.** Journal of Marketing Research 43: 259–266.
- Lindenberg S, Steg L (2007) **Normative, gain and hedonic goal-frames guiding environmental behaviour.** Journal of Social Issues 63: 117–137.
- OFS (2014) **Comptabilité environnementale. Les émissions de gaz à effet de serre par acteur économique.** www.bfs.admin.ch
- Osbaldiston R, Schott JP (2012) **Environmental Sustainability and Behavioral Science: Meta-Analysis of Proenvironmental Behavior Experiments.** Environment and Behavior 44: 257–299.
- Schubert R (2013) **Instrumente zur Vermittlung von Wertewandel und Verhaltensänderungen im nachhaltigen Umgang mit den Ressourcen der Erde.** Nova Acta Leopoldina 400: 367–396.
- Steg L (2008) **Promoting household energy conservation.** Energy Policy 36: 4449–4453.
- Weber EU (2006) **Experience-based and description-based perceptions of long-term risk: Why global warming does not scare us (yet).** Climatic Change 77: 103–120.

## 3.4 Energie

**Le système énergétique, constitué de la mise à disposition et de l'utilisation d'énergie, génère aujourd'hui 75 pour cent des émissions mondiales de gaz à effet de serre et 80 pour cent de celles de la Suisse.** La réalisation des objectifs de réduction de ces gaz dépend donc essentiellement de la réussite d'une conversion vers un système énergétique à faibles émissions de CO<sub>2</sub>. Une grande partie des émissions mondiales de gaz à effet de serre est causée par la production d'électricité, et s'il n'y a pas de contre-mesures, il faut s'attendre ici à un doublement des rejets de CO<sub>2</sub>. Ces émissions pourraient être pratiquement éliminées en passant à du courant généré essentiellement à partir de sources renouvelables et à faible intensité de carbone. Une utilisation plus efficace de l'énergie permettrait également d'abaisser les émissions du secteur industriel de moitié au niveau mondial. En Suisse, où l'électricité est produite déjà aujourd'hui presque sans émissions de CO<sub>2</sub>, la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne vise que l'utilisation d'énergie: les domaines du bâtiment et des transports offrent les plus importants potentiels de réduction.

Alexander Wokaun (PSI), Christoph Ritz (ProClim/SCNAT)

### Le système énergétique joue un rôle déterminant dans l'évolution du climat

La disponibilité d'énergie est essentielle pour le bien-être social de la population du globe, et l'énergie est un facteur de production capital de l'économie mondiale. En 2010, la mise à disposition d'énergie, basée aujourd'hui dans une large mesure sur l'exploitation thermique d'agents énergétiques fossiles, a produit 37 des 49 gigatonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub> rejetés au total dans le monde. L'utilisation et la mise à disposition d'énergie sont responsables de la part dominante (75 pour cent) des émissions mondiales de gaz à effet de serre; 65 pour cent sont rejetés sous forme de CO<sub>2</sub> et 5 pour cent en tant que méthane. Etant donné la grande persistance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère (temps de séjour de plusieurs siècles à des millénaires [Solomon 2009]), le système énergétique joue un rôle central dans les efforts pour limiter à long terme le changement climatique (IPCC 2014/WGIII/Chap.7).

En Suisse, 80 pour cent des émissions de gaz à effet de serre proviennent du système énergétique (41,5 des 52,6 mégatonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub> émis au total en 2013). La principale raison de cette proportion élevée en comparaison mondiale est la faible part des émissions de l'agriculture. Vu que le processus de mise à disposition (extraction, raffinage et transport) des agents énergétiques fossiles a lieu à l'étranger et que la production d'électricité hydraulique et nucléaire dégage très peu de CO<sub>2</sub>, des réductions de gaz à effet de serre émis par les activités énergétiques ne sont réalisables en Suisse pratiquement que pour l'utilisation de l'énergie (OFEV 2015).

### Le système énergétique : émissions de gaz à effet de serre par secteurs

Les émissions de gaz à effet de serre générées par la mise à disposition et l'utilisation d'énergie se répartissent entre

### Le système énergétique et ses émissions de gaz à effet de serre

Pour comprendre d'où proviennent les gaz à effet de serre, il est judicieux de considérer l'ensemble du système énergétique. Celui-ci se compose de la mise à disposition d'énergie et de l'utilisation d'énergie:

#### La mise à disposition d'énergie:

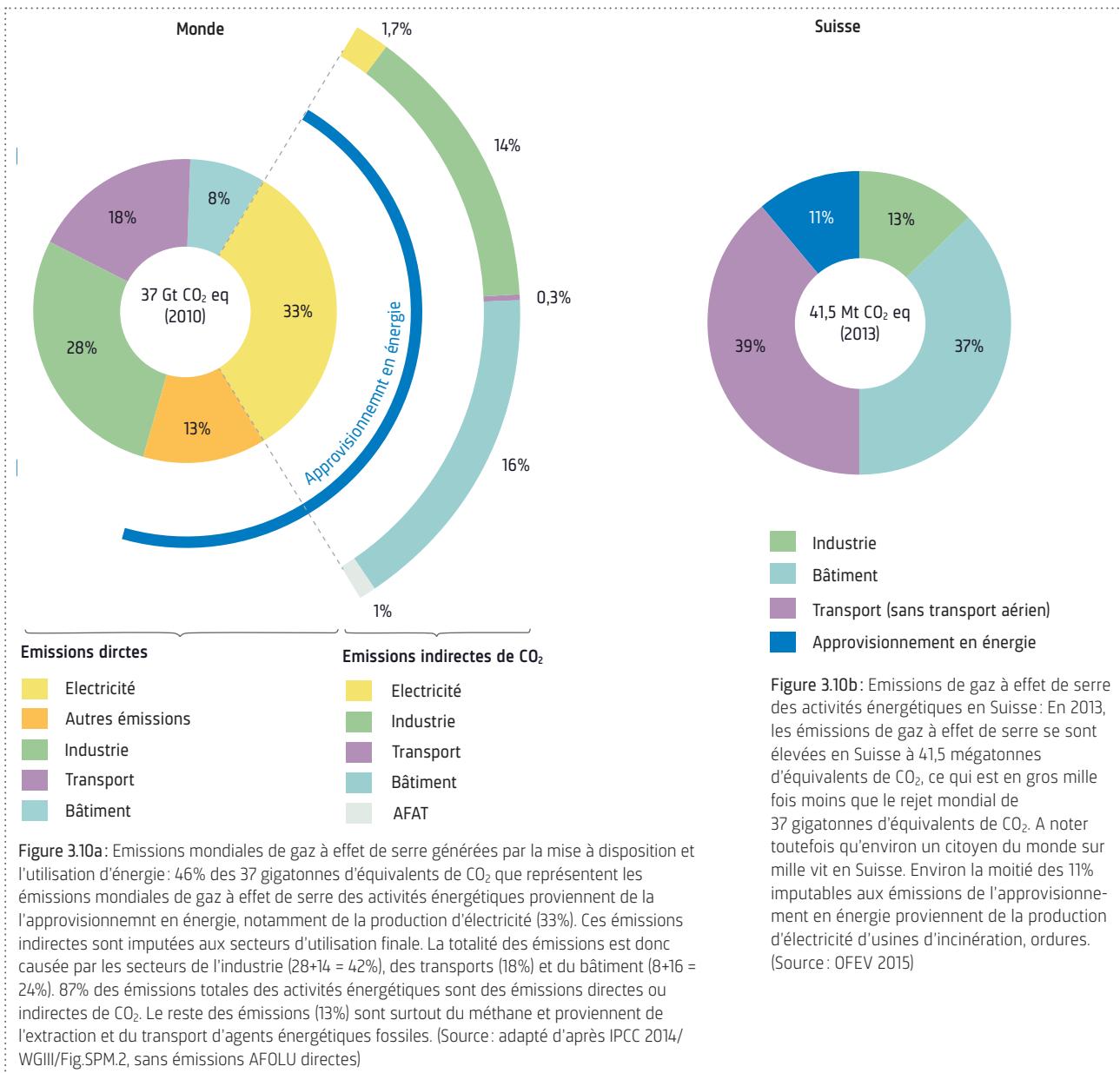
- l'acquisition des énergies primaires (par exemple charbon, combustible nucléaire, eau, vent),
- leur transformation en énergie secondaire (par exemple dans des raffineries, des centrales électriques à combustible fossile, des centrales hydrauliques ; au moyen d'éoliennes, de cellules solaires),
- le transport de l'énergie secondaire au moyen de bateaux, pipelines et réseaux électriques, jusqu'aux clients auxquels elle est fournie comme énergie finale.

#### L'utilisation d'énergie:

- la transformation de l'énergie finale en énergie utile (par exemple énergie motrice, chaleur) pour des services énergétiques (tels que le transport de marchandises et de personnes, le séchage de produits).

Les émissions qui en résultent peuvent être directes ou indirectes:

- **Les émissions directes** sont celles produites sur place lors de l'utilisation de l'énergie (par exemple lors de la conduite d'un véhicule actionné par un moteur à essence ou lors de la combustion de mazout dans une installation de chauffage).
- **Les émissions indirectes** découlent de l'utilisation de biens ou d'électricité dont la production en un autre lieu ou dans un autre pays a généré des émissions (par exemple l'alimentation d'un véhicule électrique avec du courant provenant d'une centrale à charbon).
- **Les émissions grises** sont des émissions indirectes qui ont été produites à l'étranger et importées en Suisse avec les biens et leur transport ou qui proviennent du trafic aérien.



**Figure 3.10a:** Emissions mondiales de gaz à effet de serre générées par la mise à disposition et l'utilisation d'énergie: 46% des 37 gigatonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub> que représentent les émissions mondiales de gaz à effet de serre des activités énergétiques proviennent de la l'approvisionnement en énergie, notamment de la production d'électricité (33%). Ces émissions indirectes sont imputées aux secteurs d'utilisation finale. La totalité des émissions est donc causée par les secteurs de l'industrie (28+14 = 42%), des transports (18%) et du bâtiment (8+16 = 24%). 87% des émissions totales des activités énergétiques sont des émissions directes ou indirectes de CO<sub>2</sub>. Le reste des émissions (13%) sont surtout du méthane et proviennent de l'extraction et du transport d'agents énergétiques fossiles. (Source: adapté d'après IPCC 2014/WGIII/Fig.SPM.2, sans émissions AFOLU directes)

les quatre secteurs de l'industrie, des transports, du bâtiment et des différentes utilisations du sol au niveau mondial et en Suisse (fig. 3.10a et 3.10b).

### La situation mondiale

La figure 3.10a montre les émissions directes et indirectes de gaz à effet de serre générées dans le monde par les principaux secteurs. Presque la moitié (46 pour cent) des gaz à effet de serre émis par les activités énergétiques proviennent de la **l'approvisionnement en énergie**, en majeure partie de la production (ou mise à disposition, voir encadré) d'électricité de centrales thermiques fossiles, avant tout à charbon (33 pour cent du total). Le plus souvent, les rejets

de chaleur des centrales thermiques ne sont pas utilisés. Les autres 13 pour cent sont imputables à l'extraction des agents énergétiques fossiles, à leur traitement dans des raffineries et à leur transport jusqu'aux utilisateurs finaux.

Pour l'**utilisation d'énergie**, l'industrie est, avec une part de 42 pour cent, la principale source de gaz à effet de serre. Elle consomme presque la moitié de l'électricité produite dans le monde et cause ainsi des émissions indirectes de CO<sub>2</sub> considérables. Les émissions directes de l'industrie proviennent, pour la moitié environ, de la génération de chaleur pour la production de ciment et de métaux et pour l'industrie chimique. Le secteur du bâtiment est responsable de 24 pour cent et celui des transports de 18 pour cent des émissions mondiales. A noter que deux tiers

- Industrie
- Bâtiment
- Transport (sans transport aérien)
- Approvisionnement en énergie

**Figure 3.10b:** Emissions de gaz à effet de serre des activités énergétiques en Suisse: En 2013, les émissions de gaz à effet de serre se sont élevées en Suisse à 41,5 mégatonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub>, ce qui est en gros mille fois moins que le rejet mondial de 37 gigatonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub>. A noter toutefois qu'environ un citoyen du monde sur mille vit en Suisse. Environ la moitié des 11% imputables aux émissions de l'approvisionnement en énergie proviennent de la production d'électricité d'usines d'incinération, ordures. (Source: OFEV 2015)

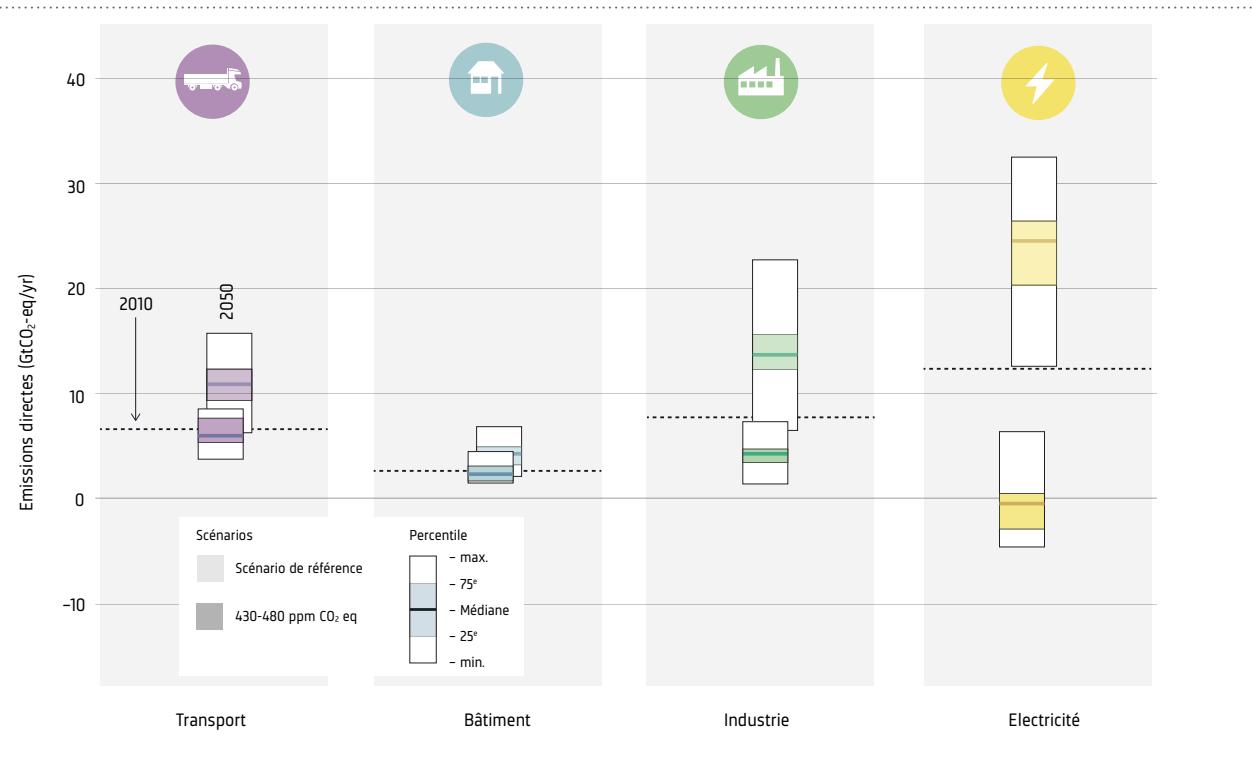


Figure 3.11: Emissions mondiales directes de gaz à effet de serre par secteurs. Les émissions de 2010 sont représentées par une ligne pointillée (elles correspondent aux valeurs de la fig. 3.10a). Dans l'hypothèse « Poursuite de la politique énergétique actuelle » (RCP8.5, barres faiblement colorées), les émissions directes augmentent massivement jusqu'en 2050 par rapport à aujourd'hui dans les secteurs des transports, de l'industrie et de la production d'électricité. Elles restent à peu près au niveau actuel dans le secteur du bâtiment. Pour atteindre l'objectif des 2 degrés Celsius (barres en couleurs intenses), il faut notamment que le bilan en CO<sub>2</sub> du secteur de l'électricité devienne neutre. Les changements des besoins d'électricité des différents secteurs (c'est-à-dire les émissions indirectes) sont attribués au secteur de l'électricité. (Source: adapté d'après IPCC 2014/SYR/Fig.SPM.14)

des émissions des bâtiments sont indirectes, car dues à la consommation d'électricité.

## La situation en Suisse

En Suisse (fig. 3.10b), les émissions de gaz à effet de serre en matière d'**approvisionnement en énergie** sont faibles, de 11 pour cent seulement, ce qui tient surtout au fait que l'électricité est produite pratiquement sans émissions de CO<sub>2</sub>, par la force hydraulique (60%) et par l'énergie nucléaire (40%).

En matière d'**utilisation d'énergie**, les émissions proviennent en premier lieu des transports (39%) et du secteur du bâtiment (37%). Les émissions de l'industrie sont relativement faibles, de 13 pour cent seulement. Le pourcentage des émissions du secteur des transports est ainsi environ deux fois plus élevé en Suisse qu'au niveau mondial.

## Objectifs et mesures

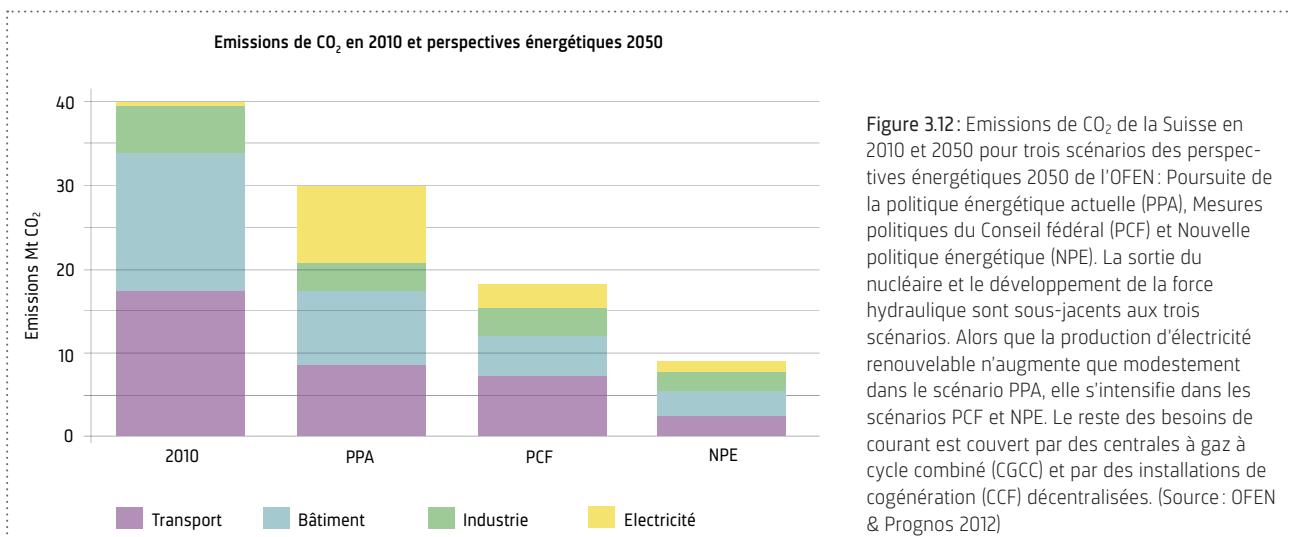
Les objectifs généraux de réduction des émissions au niveau mondial s'appliquent également à la Suisse et concernent en premier lieu le domaine de l'énergie. Ce sont :

- La substitution des agents fossiles par des énergies à faibles émissions de CO<sub>2</sub>, qui entraînent peu de nuisances pour l'environnement et
- une réduction de l'utilisation d'énergie grâce à une plus grande efficacité énergétique et à une adaptation du comportement (cf. chap. 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement, p. 164).

## Au niveau mondial

### L'approvisionnement en énergie

Dans le scénario sans mesures explicites de protection du climat (dit scénario de référence) RCP8.5, l'on s'attend à ce que les besoins mondiaux d'énergie primaire doublent presque d'ici 2050 (fig. 3.11). Une réduction des émissions de gaz à effet de serre nécessite donc une transformation du système énergétique telle que discutée dans les différents scénarios climatiques (cf. chap. 1.5 Scénarios pour les futures émissions de gaz à effet de serre, p. 38). L'**électricité** est considérée comme une importante alternative à d'autres énergies finales, car il est plus facile et moins coûteux de décarboniser des grandes centrales électriques que les secteurs du bâtiment, des transports et de l'industrie. Indépendamment du scénario, la décarbonisation de la produc-



tion de courant est urgente, vu que la demande d'électricité augmente au niveau mondial. En principe, les possibilités suivantes sont à disposition :

- Un développement intense des énergies renouvelables, en particulier des installations éoliennes et photovoltaïques. L'exploitation énergétique de la biomasse peut apporter une contribution supplémentaire substantielle. Des centrales géothermiques et l'énergie de l'océan (marées, vagues) sont également mentionnées,
- le remplacement de centrales à charbon par des centrales à gaz à cycle combiné à haut rendement (de plus de 60 pour cent),
- la séparation du CO<sub>2</sub> des gaz de combustion de centrales à charbon et à gaz et stockage géologique (Carbon Capture and Storage, CCS) et
- le recours à l'énergie nucléaire pour autant que les exigences en matière de sécurité, cycle du combustible et gestion des déchets soient remplies.

Les auteurs du GIEC estiment que *toutes* ces mesures sont nécessaires pour stabiliser le climat; c'est pourquoi le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC ne fixe aucune priorité à ce sujet. Les mesures doivent être choisies dans ce portefeuille en fonction des spécificités du pays, d'une optimisation économique et de préférences politiques et sociales.

### L'utilisation d'énergie

Une condition essentielle pour atteindre tout objectif de stabilisation du climat est que l'efficacité énergétique augmente, vu qu'elle influence de façon déterminante la demande d'énergie primaire. Les possibilités d'améliorer cette efficacité diffèrent d'un secteur à un autre, comme le montre la figure 3.11.

Dans le **secteur des transports**, les émissions directes (surtout de CO<sub>2</sub>) dues à la consommation de carburant dominent.

Pour abaisser ici les besoins d'énergie, des changements du comportement d'utilisation sont nécessaires en plus des mesures techniques. Il faut notamment que les distances parcourues par les personnes et les marchandises diminuent et que l'on évite des courses à vide ou des déplacements individuels parallèles sur un même parcours. Le développement doit aller dans le sens d'un système coordonnant plusieurs moyens de transport. Des mesures à cette fin peuvent être prises aux différents niveaux suivants :

- Un aménagement du territoire visant à abaisser les besoins de mobilité et à optimiser la répartition du trafic entre différents modes de transport,
- des changements de comportement et le recours aux télécommunications et aux techniques de l'information pour diminuer le nombre des transports physiques,
- la promotion des produits locaux/régionaux et l'incitation à produire des marchandises dans un périmètre géographique réduit en appliquant à leur transport un prix adéquat pour le CO<sub>2</sub>,
- l'augmentation de l'efficacité des infrastructures de transport,
- l'augmentation de l'efficacité des moyens de transport et
- le remplacement des carburants fossiles par des carburants contenant peu de carbone, en considérant toutefois la totalité de leur cycle de production.

Dans le **secteur du bâtiment**, une augmentation mondiale des besoins d'énergie utile d'environ 80 pour cent est attendue d'ici 2050; cela tient à la demande grandissante d'espace d'habitation par personne, notamment dans les pays émergents et en développement, ainsi qu'à la croissance démographique et à la hausse des exigences en matière de refroidissement. Il faut compter avec une augmentation semblable des besoins d'énergie dans les bâtiments utilisés pour des activités commerciales. Toutefois, même sans mesures de politique climatique, le changement des émissions directes

de CO<sub>2</sub> des bâtiments est relativement faible en comparaison des autres secteurs (barres faiblement colorées à la fig. 3.11). Les principales raisons à cela sont :

- une meilleure isolation et technique du bâtiment,
- la substitution des agents fossiles pour le chauffage et la production d'eau chaude par d'autres énergies, par exemple l'énergie solaire thermique ou la géothermie et
- la consommation croissante d'électricité du secteur du bâtiment est mise sur le compte du secteur de l'électricité.

Dans le scénario de base « poursuite de la politique énergétique actuelle », les émissions directes de gaz à effet de serre du **secteur de l'industrie** augmentent rapidement (fig. 3.11). Une partie seulement des émissions de ce secteur sont des émissions directes. Leur croissance résulte d'un besoin accru d'énergie, notamment pour produire de la chaleur destinée à des processus industriels. Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC estime que ces émissions directes de gaz à effet de serre peuvent être réduites de moitié environ, et ceci pour l'essentiel au moyen de techniques disponibles aujourd'hui. L'industrie peut réaliser de très importantes économies également en matière d'émissions indirectes, c'est-à-dire dans la consommation d'électricité. D'autres réductions des besoins énergétiques, et donc des émissions de gaz à effet de serre, peuvent être obtenues en augmentant l'efficacité des matériaux et en recyclant ceux dont la production est gourmande en énergie. La gestion et la valorisation de flux de déchets ainsi que l'exploitation des rejets thermiques des installations de refroidissement pour produire de la chaleur industrielle sont également des moyens de réduire la consommation d'énergie dans l'industrie.

La biomasse, en particulier le bois, provenant du **secteur de l'agriculture, de l'économie forestière et d'autres utilisations du sol (AFOLU)**, était la principale source d'énergie avant le début de la révolution industrielle, mais a perdu de son importance dans les pays industrialisés à cause du bas prix des ressources fossiles. Des formes durables de l'exploitation énergétique à grande échelle de la biomasse font l'objet d'une discussion internationale intense. A part le fait que la culture de plantes à des fins énergétiques est en concurrence avec la production de denrées alimentaires, c'est avant tout le souci d'éviter des émissions de poussières fines et d'oxydes d'azote, et donc la protection de l'air, qui sont au centre du débat. En Suisse, des concepts centrés sur l'exploitation de déchets sont relativement bien avancés.

## En Suisse

Les scénarios des perspectives énergétiques 2050 (OFEN & Prognos 2012) constituent la base de la Stratégie énergétique 2050. Depuis leur publication, ils sont discutés au niveau politique. Le premier paquet de mesures de la Stratégie énergétique 2050, soumis au Parlement par le Conseil fédéral, correspond au scénario « Mesures politiques du Conseil fédéral » (PCF), tandis que les objectifs à long terme de la Stratégie énergétique suivent le scénario « Nouvelle politique énergétique » (NPE). Le scénario « Poursuite de la politique énergétique actuelle » (PPA) représente le développement des mesures en vigueur jusqu'ici (fig. 3.12).

- **NPE**: Scénario cible selon lequel la consommation d'énergie et la production d'électricité de la Suisse évoluent de manière à abaisser les émissions de CO<sub>2</sub> du domaine de l'énergie à 1 à 1,5 tonnes par habitant jusqu'en 2050. Ce scénario implique une politique d'efficacité énergétique et de réduction du CO<sub>2</sub> coordonnée sur le plan international.
- **PCF**: Ce scénario est axé sur la prise de mesures et met en évidence comment le premier paquet de mesures de concrétisation de la Stratégie énergétique se répercute sur la demande d'énergie et l'offre d'électricité. Dans ce scénario, l'accent porte sur des dispositions touchant à l'utilisation de l'énergie, sur l'emploi des énergies renouvelables dans les bâtiments et sur les énergies renouvelables côté offre en électricité. Ce scénario est peu dépendant de la politique énergétique internationale.
- **PPA**: Jusqu'en 2050, tous les instruments, mesures et lois en vigueur aujourd'hui en matière de politique énergétique sont maintenus pendant l'horizon temporel considéré et seulement adaptés – éventuellement avec du retard – en fonction des progrès techniques. Ce scénario ne prévoit aucun changement de comportement ou du développement de la demande.

Tous les scénarios supposent que les centrales nucléaires existantes ne seront pas remplacées au terme de leur durée d'exploitation. Si celle-ci est de 50 ans, la dernière centrale nucléaire serait mise hors service en 2034. Tous les scénarios prévoient un recours accru à la force hydraulique et un développement modéré de la cogénération (CCF). Alors que la production d'électricité renouvelable n'augmente que modestement dans le scénario PPA (variante C), elle s'intensifie nettement dans les scénarios PCF et NPE (variantes C et E). Des centrales à gaz à cycle combiné (CGCC) sont construites pour couvrir le reste des besoins de courant. Le remplacement partiel des centrales nucléaires par des installations utilisant des combustibles fossiles implique une augmentation plus ou moins forte des émissions de CO<sub>2</sub> dans tous les scénarios.

Seul le scénario NPE est compatible avec l'objectif des 2 degrés, arrêté au niveau politique.<sup>1</sup> Il prévoit une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> du domaine de l'énergie de quelque 75 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à 2010, couplée à une réduction de la demande d'énergie finale d'environ 45 pour cent pour une croissance d'environ 45 pour cent de l'économie nationale (perspectives énergétiques 2050). La part des énergies fossiles diminue massivement avant tout pour le chauffage

<sup>1</sup> Lors du sommet international sur le climat COP21, qui s'est tenu à Paris en décembre 2015, les pays membres ont même formulé un objectif souhaitable de 1,5 degrés.

des bâtiments – d'une part grâce à une meilleure isolation et d'autre part en raison de la substitution de combustibles fossiles par d'autres ressources énergétiques (principalement les pompes à chaleur, mais aussi la cogénération et les réseaux de chaleur à distance). Une deuxième contribution importante est l'effort visant une substitution radicale des carburants fossiles – essence et diesel – dans le secteur des transports. La production d'électricité est basée avant tout sur la force hydraulique et des énergies renouvelables. Dans ces conditions, l'ambitieux scénario NPE parvient à réduire les émissions domestiques de CO<sub>2</sub> d'environ 75 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à 2010.

## Défis pour la Suisse

Le succès des mesures suisses de réduction des émissions de gaz à effet de serre dépend fortement de l'efficacité des instruments conçus pour mettre en œuvre la politique énergétique et climatique. Des défis spécifiques se présentent dans les domaines où l'horizon temporel des investissements est très long, par exemple lors du développement de centrales à accumulation ou d'infrastructures de transport.

La part importante des émissions « grises » ou indirectes (cf. encadré Le système énergétique et ses émissions de gaz à effet de serre, p. 168) de la Suisse, due au tourisme et à la grande quantité de biens importés, représente également un défi. Ces émissions ne sont pas prises en compte lors de la production dans les pays concernés et lors de transports par bateau ou par avion (Jungbluth et al. 2011).

Avec sa structure urbaine dense et ses transports en commun bien développés, la Suisse offre de bonnes conditions à un changement de la répartition entre les différents modes de déplacement et à l'utilisation de concepts de motorisation optimisés, pour autant que la production des carburants (électricité et biocarburants) dégage aussi peu de CO<sub>2</sub> que possible. Cependant, de nombreuses mesures en matière de transports se heurtent à des obstacles politiques.

Dans le secteur du bâtiment, les problèmes résident avant tout dans l'assainissement d'anciennes constructions, essentiel pour réduire de façon déterminante les rejets de CO<sub>2</sub> des chauffages utilisant des combustibles fossiles. Pour atteindre les objectifs de réduction jusqu'en 2050, il faudrait au moins doubler le taux de ces assainissements, qui est actuellement de un pour cent environ par an.

La réduction massive projetée de la consommation d'agents énergétiques fossiles diminue la dépendance de l'étranger et ses implications géopolitiques relatives à l'importation de matières premières. Par contre, elle confère à l'électricité un rôle encore plus important que jusqu'ici, ce qui implique une bonne intégration de la Suisse dans le réseau

électrique européen. D'énormes distorsions du marché existent notamment pour le courant importé; elles sont causées par l'électricité produite dans des installations éoliennes et photovoltaïques, qui est bon marché en raison de rétributions accordées à l'étranger pour le courant injecté, ainsi que dans des centrales à charbon, qui ne paient aujourd'hui qu'un droit d'émission négligeable par tonne de CO<sub>2</sub>. Ceci conduit à des problèmes de rentabilité pour la force hydraulique suisse, qui sera la principale source indigène de courant après l'arrêt des centrales nucléaires et qui permet de surcroît le stockage saisonnier de l'électricité.

L'exploitation accrue de sources variables d'énergie renouvelable nécessite davantage de redondances dans le réseau électrique suisse. Les petits réseaux indépendants (« microgrids ») de production autonome de courant présentent un risque de pannes et de désolidarisation. A l'avenir, l'approvisionnement en électricité pourrait être critique surtout en hiver, saison pendant laquelle la production des centrales au fil de l'eau et des installations photovoltaïques est réduite, tandis que la demande de chaleur et de courant augmente.

Un autre défi pour la production d'électricité est la transition du nucléaire aux énergies renouvelables. Ces dernières ne se développeront probablement pas assez vite pour remplacer à temps la production d'électricité des centrales nucléaires mises hors service. Si des centrales à gaz devaient être utilisées pendant une période de transition, il faudrait compenser leurs émissions dans d'autres secteurs, par exemple en recourant davantage aux pompes à chaleur pour le chauffage des bâtiments.

## Bibliographie

- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. Chapter 7 «Energy Systems». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)*. [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR)*. Summary for Policymakers (SPM). [www.ipcc.ch/report/ar5/syr](http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr)
- Jungbluth N, Nathani C, Stucki M, Leuenberger M (2011) *Environmental Impacts of Swiss Consumption and Production*. A combination of input-output analysis with life cycle assessment. Federal Office for the Environment, Bern. Environmental studies 1111: 171.
- OFEN, Prognos (2012) *Die Energieperspektiven für die Schweiz bis 2050. Energienachfrage und Elektrizitätsangebot in der Schweiz 2000–2050*. Perspectives énergétiques 2050.
- OFEV (2015) *Inventaire des émissions de gaz à effet de serre 2015*. [www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre](http://www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre)
- Solomon S, Plattner GK, Knutti R, Friedlingstein P (2009) *Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions*. PNAS 106: 1704–1709.

## 3.5 Transports

**En Suisse, les émissions engendrées par le secteur des transports émanent principalement du trafic routier de personnes et de marchandises.** Si la tendance à des voitures de plus en plus lourdes et puissantes s'accompagne d'une amélioration de leur efficacité énergétique, celle-ci se voit largement compensée par l'accroissement de la circulation, d'où l'augmentation des gaz de serres constatée en 2007. Sous l'effet des nouveaux instruments politiques instaurés en 2008, l'efficacité énergétique s'est encore améliorée et les émissions de gaz à effet de serres sont restées stables depuis lors dans le secteur des transports; aucune tendance à la baisse n'est donc discernable à ce jour. A l'échelle mondiale, l'augmentation des revenus est accompagnée par celle des transports de personnes et de biens. Pour empêcher que le trafic réduise à néant tous les autres efforts entrepris dans ce sens, il est indispensable que les émissions de CO<sub>2</sub> qu'il engendre soient nettement dissociées de toute considération liée aux performances économiques.

Peter de Haan (*Ernst Basler + Partner*)

La mobilité est une condition essentielle au développement économique (transports de marchandises et marché du travail) et social (interactions sociales et loisirs). Sur tout dans le domaine des loisirs, elle peut représenter une fin en soi et non pas se réduire à couvrir une distance de A à B. Cela se traduit par l'augmentation chaque année du degré de motorisation de la population de Suisse et du monde entier – et avec elle, du volume du trafic. Notre mode de vie rend la mobilité impérative et amène à la considérer comme allant de soi; on a donc tendance à fermer les yeux sur ses méfaits (pollution atmosphérique, bruit, embouteillages).

### Degré de motorisation

Alors qu'en 1990, le nombre de voitures pour mille habitants n'était encore que de 442, en 2015 il atteignait un pic de 541, soit 22 pour cent de plus. En Suisse et ce en dépit d'un pouvoir d'achat élevé, le taux de motorisation des particuliers se situe légèrement au-dessous de ses voisins, ce qui peut trouver son explication dans la densité de son réseau de transports publics. Le pouvoir d'achat plus élevé en Suisse se traduit plutôt par l'achat de véhicules neufs plus coûteux et plus performants. Les statistiques relatives au nombre de véhicules circulant sur les routes de Suisse présentent ces chiffres pour l'année 2015:

### Les moyens de transport

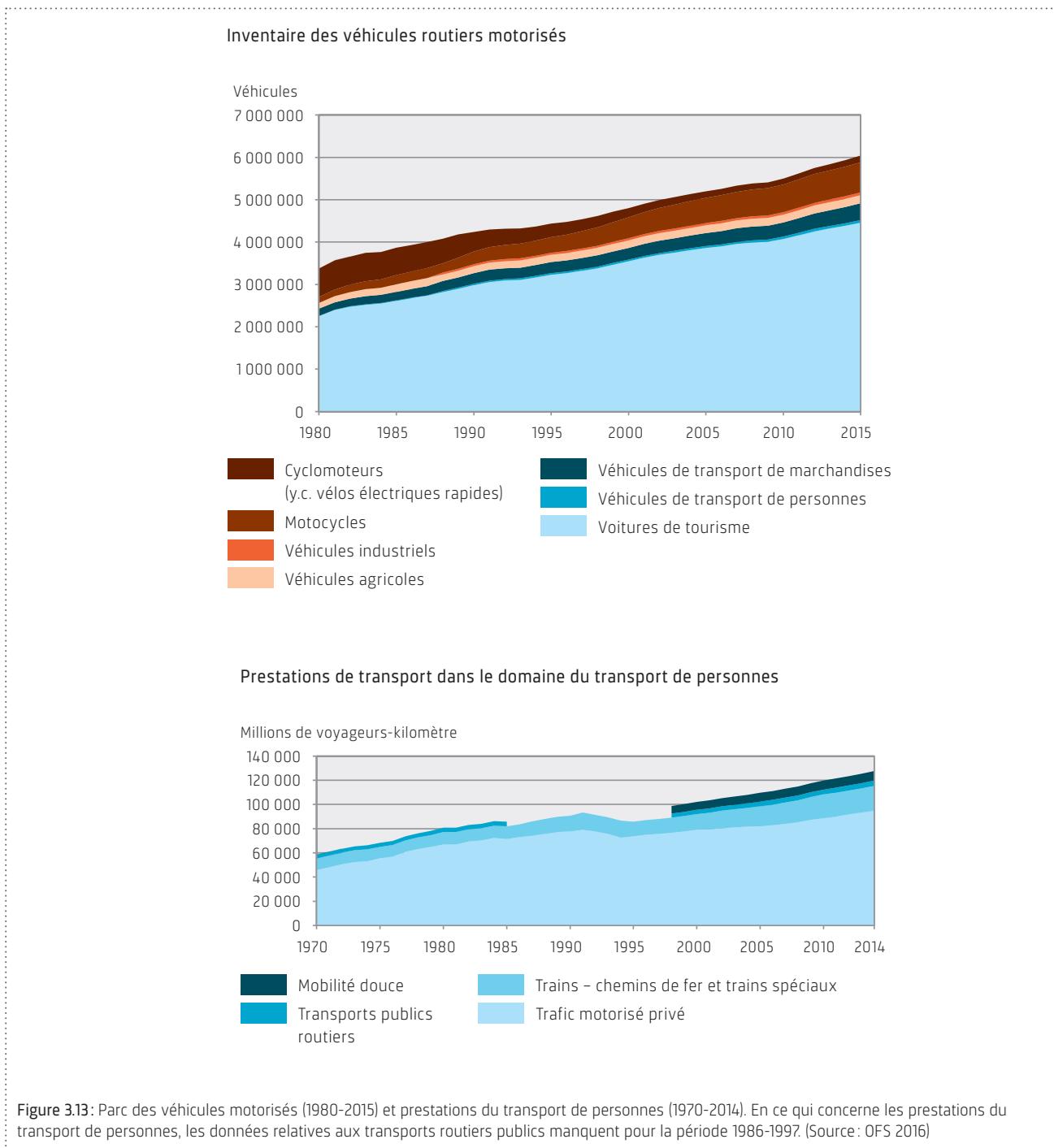
Au trafic routier viennent s'ajouter les transports aériens, maritimes, fluviaux, lacustres et ferroviaires et militaires, sans oublier les véhicules hors route, tels que machines de chantier, tracteurs agricoles et forestiers et véhicules industriels, ainsi que les appareils mobiles (tondeuses à gazon), ces deux dernières catégories revêtant une importance relativement minime.

- 4 450 000 voitures de tourisme,
- 65 000 autobus,
- 340 000 véhicules de livraison,
- 54 000 camions/poids lourds,
- 672 000 motocycles,
- 153 000 motocycles légers et cyclomoteurs,
- 191 000 véhicules agricoles et forestiers et
- 67 000 véhicules industriels.

### Volume du trafic

En Suisse, les transports publics (2014: 24,3 milliards voyageurs-kilomètre<sup>1</sup>) affichent une croissance annuelle d'environ 1 pour cent, le trafic motorisé individuel (2014: 95 milliards voyageurs-kilomètre) de 1,8 pour cent (en majeure partie sur les autoroutes); le transport de marchandises par rail (2014: 12,3 milliards tonnes-kilomètre) augmente chaque année de 2,8 pour cent, leur transport par route (2014: 17,5 milliards tonnes-kilomètre) de 1 pour cent par année. Les angles sous lesquels la politique d'aménagement du territoire et celle des transports ont abordé la question n'ont pas permis à ce jour de freiner la forte croissance du trafic. Au moyen de la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP), du subventionnement des transports publics de personnes et du fort développement de leur réseau, les pouvoirs publics cherchent à reporter la majeure partie de la croissance des transports de personnes et de marchandises sur le rail. Dans le reste du monde aussi, le volume du trafic augmente, celui des personnes de 80 pour cent et celui des marchandises de 50 pour cent d'ici 2050 par rapport à 2010, annonce le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGIII/Chap.8).

<sup>1</sup> Valeur numérique des prestations de transport; 1000 voyageurs-kilomètre correspondent à un train transportant 100 personnes sur 10 kilomètres ou une voiture parcourant 250 km avec 4 personnes à bord.



En plus des raisons d'ordre démographique, cette hausse s'explique par la transformation de l'économie. La croissance du secteur tertiaire et des services suit de près la production économique et la mobilité leur emboîte le pas. De nombreuses personnes travaillant dans les centres urbains doivent franchir des distances de plus en plus grandes pour s'y rendre, du fait de ne plus pouvoir habiter

près de leur lieu de travail. Ces deux liens de cause à effet sont particulièrement prononcés en Suisse, où ils tendent à devenir une généralité.

Pour faire baisser le taux d'émissions de gaz à effet de serre malgré l'augmentation du trafic, c'est sur l'efficacité

énergétique des voitures que les efforts doivent se concentrer année après année afin de l'améliorer.

## Tendances relevées pour les voitures de tourisme

Dès lors qu'une voiture est mise en circulation, elle ne quitte plus la route jusqu'à ce qu'elle soit techniquement à bout de course, peu importe qu'elle soit énergétiquement efficace ou non. La double politique énergétique et climatique de la Suisse concentre donc ses efforts sur les achats de voitures neuves. Les prescriptions concernant les émissions de CO<sub>2</sub> ne s'appliquent encore qu'aux voitures de tourisme, mais non aux véhicules de livraison. Depuis 2015, une limite est fixée à leurs émissions de CO<sub>2</sub>, exprimée en nombre de grammes par kilomètre. Lorsque cette limite est dépassée, le propriétaire de la voiture est soumis à une sanction. C'est un moyen d'amener les constructeurs automobiles à concentrer leurs innovations sur l'efficacité énergétique et les vendeurs à les vendre au public. Il ne devrait pas en résulter que la voiture moyenne voit sa taille diminuer, ni son prix augmenter, étant donné que les limites annuelles assignées aux perfectionnements techniques devraient suffire à atteindre les objectifs fixés. Entre 1996 et 2014, le taux moyen d'émissions de CO<sub>2</sub> des voitures de tourisme neuves a baissé chaque année de 2,3 pour cent (OFEV 2015); or une plus forte réduction aurait été obtenue si la taille et la puissance moyenne de ces voitures n'avaient pas augmenté.

L'UE entend promulguer une directive analogue s'appliquant aux véhicules de livraison, du fait qu'à l'instar des voitures de tourisme, les moteurs des modèles lancés sur le marché sont souvent surpuissants. Le Conseil fédéral a proposé au Parlement d'intégrer cette directive à la législation.

## La loi sur le CO<sub>2</sub> n'a pas atteint son objectif partiel

La raison pour laquelle l'efficacité énergétique des systèmes de propulsion mobile est supérieure à celle des applications fixes est que plus d'attention lui a été accordée du fait que le carburant doit être transporté. L'objectif partiel carburants de la loi sur le CO<sub>2</sub> (une réduction de 8 pour cent des émissions de gaz carbonique entre 1990 et 2020) était fixé avec moins de rigueur que l'objectif partiel des combustibles (réduction de 15 pour cent). En dépit de cela, l'objectif carburants n'a pas pu être réalisé en raison d'une forte augmentation du nombre de véhicules privés en circulation, qui a passé de 78 millions de voyageurs-kilomètre en 1990 à 95 millions en 2014, soit 22 pour cent de plus.

En plus du volume de trafic accru et de l'augmentation de la taille des voitures de tourisme, il y a une troisième raison à ce que les émissions de CO<sub>2</sub> ne baissent pas, malgré une efficacité énergétique en hausse: la consommation effective de carburant s'éloigne toujours plus de la quantité fixée comme norme par le biais d'un test effectué au niveau fédéral. Alors que l'écart était auparavant de moins de dix pour cent, il s'est creusé par la suite, atteignant jusqu'à 40 pour cent pour des véhicules construits dans les années 2012 et 2013. Ils étaient par conséquent conformes à ce test, voire, comme dans le cas de Volkswagen, nouvellement rééquipés pour augmenter leur efficacité énergétique en regard des critères de celui-ci. Il en résulte que, tels qu'ils sont livrés et conduits dans leur état actuel, ces véhicules consomment nettement plus de carburant qu'avant.

## Tendances relevées pour le trafic par rail et les transports de marchandises

La répartition du volume de transport entre les divers moyens de locomotion (répartition modale) utilisés en Suisse s'est légèrement décalée: en 2014, les transports publics affichaient un volume de trafic total de 20,4 pour cent contre seulement 18 pour cent en 1990.

Le transport de marchandises s'est considérablement développé dans toute l'Europe, passant en Suisse de quelque 20 milliards de tonnes-kilomètre en 1990 à 30 milliards. Alors qu'en 1990, environ la moitié des transports de marchandises s'effectuait par la route (10 milliards de tonnes-kilomètre), ils représentaient en 2013 une part de quelque 60 pour cent (17,5 milliards tonnes-kilomètre). Que la Suisse soit parvenue à stabiliser la part des transports de marchandises par rail à près de 40 pour cent – contrairement au reste de l'Europe, où leur proportion diminue – est dû à l'interdiction faite aux poids lourds de rouler la nuit, à la perception de la redevance sur le trafic des poids lourds liée aux prestations (RPLP) et au subventionnement des transports ferroviaires transalpins. L'instauration de la RPLP a placé la Suisse au rang de précurseur: la perception de cette taxe permet une imputation interne des coûts externes liés au transport de marchandises.

## Tendances relevées pour les transports aériens

Le relevé des émissions de CO<sub>2</sub> émanant du trafic aérien domestique procède de diverses définitions des frontières sectorielles, c'est-à-dire des critères pris en compte pour attribuer ces émissions à chaque pays. Les quotas fixés par le Protocole de Kyoto n'intègrent que le carburant

utilisé pour les vols domestiques ; à la différence de pays de la taille des Etats-Unis, les vols effectués sur le réseau aérien interne de petits pays comme la Suisse sont quasi insignifiants. Pour sa part, le GIEC prend en considération tous les vols vendus à l'intérieur d'un pays et le carburant que ceux-ci consomment. Pour en faire le calcul exact, il faudrait se baser sur l'empreinte écologique (la consommation en ressources) de tous les vols effectués par la population suisse, par conséquent aussi ceux vers l'étranger. Bien qu'aussi applicable à d'autres domaines, ce principe a surtout une raison d'être dans les transports aériens, étant donné que les émissions qu'entraînent les déplacements des Suisses en avion affectent en majorité des pays étrangers.

Les chiffres concernant la consommation de kérosène varient en fonction de la base sur laquelle celle-ci est calculée.

- **Protocole de Kyoto:** les vols domestiques consomment près de 100 millions de litres de kérosène.
- **IPCC:** les vols vendus en Suisse représentent au total quelque 1900 millions de litres de kérosène.
- **Empreinte écologique:** environ 2500 millions de litres de kérosène pour tous les voyages en avion des Suisses.

Grâce à l'apparition dès 1990 de nouveaux modèles d'avions plus grands, plus légers et avec un taux d'occupation plus équilibré, leur consommation de kérosène dans le monde entier a diminué de 60 pour cent, se réduisant actuellement à 3,7 litres pour 100 voyageurs-kilomètre. Cependant, le volume du trafic aérien est toujours en forte augmentation : globalement de 4,6 pour cent par année et de 5,11 pour cent en Suisse pendant la période de 2010 à 2012. Les émissions de CO<sub>2</sub> du trafic aérien global se sont en même temps amplifiées, estimées à 40 pour cent de plus en 2010 qu'en 1990. L'accroissement du trafic aérien a pour principales causes les distances de plus en plus éloignées franchies par les avions et la mise en service de modèles plus grands. Le nombre de vols n'a en revanche que peu augmenté.

Selon la plupart des projections, le trafic aérien mondial annuel est appelé à progresser de cinq pour cent, tandis que l'efficacité énergétique des avions augmente de deux pour cent par année. Pour des pays industrialisés comme la Suisse, cela signifie que les éventuelles réductions des émissions de gaz à effets de serre émanant des transports routiers seront largement compensées par l'augmentation de celles engendrées par le trafic aérien pris en compte séparément.

## Bibliographie

- INTRAPLAN (2015) **Monitoring der Wettbewerbsfähigkeit des Schweizer Luftverkehrs 2015.** V2.1c, mars 2015: 26. [www.bazl.admin.ch](http://www.bazl.admin.ch)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** Chapter 8 «Transport». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- OFEV (2015) **Inventaire des émissions de gaz à effet de serre 2015.** [www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre](http://www.bafu.admin.ch/inventaire-gas-serre)
- OFS (2016) **Mobilité et transports. Statistique de poche 2016.** Office fédéral de la statistique (OFS), Neuchâtel, 43 pp.
- Route Suisse (2016) **Fédération routière suisse FRS. Vadémecum 2016 – les plus importants chiffres des années 2014/2015.** [www.strasseschweiz.ch/fr](http://www.strasseschweiz.ch/fr)

## 3.6 Aspects techniques

**Les efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre misent dans le monde entier sur de nouvelles techniques qui permettent d'améliorer l'efficacité en matière d'énergie et de rejets. Des prescriptions, incitations, subventions et informations encouragent l'innovation dans ce domaine. Par contre, une réduction de la consommation n'est presque pas prise en considération comme moyen de réduire les émissions, en dépit de potentiels théoriques considérables. Dans ce domaine de la technique, la Suisse est leader avant tout pour ce qui est des bâtiments; dans le secteur des transports, de même que dans celui de l'industrie et de l'artisanat, elle reprend pour l'essentiel la politique de l'UE.**

Peter de Haan (*Ernst Basler + Partner*)

Dans le domaine de la technique, trois voies se présentent pour réduire les émissions :

- la réduction de l'énergie nécessaire par unité de consommation,
- la réduction des émissions de gaz à effet de serre par unité d'énergie et
- la réduction de la demande de ces unités de consommation.

Les deux premières voies représentent l'approche dite de l'**efficacité**, la troisième celle de la **sobriété**. Tant en Suisse qu'au niveau international, la politique climatique et énergétique met l'accent sur l'efficacité.

quences des changements climatiques sur le système énergétique suisse, p. 129, chap. 3.1 Introduction, p. 154).

### Bâtiments : nombreuses nouvelles constructions et insuffisance des assainissements

Dans le secteur du bâtiment, le renforcement en cours des prescriptions poursuit le même objectif pour les nouvelles constructions et pour les rénovations. Grâce aux modèles cantonaux de prescriptions en matière de bâtiments, la Suisse fait des progrès rapides dans ce secteur en comparaison du reste de l'Europe.

Les prescriptions cantonales s'appliquant aux nouveaux bâtiments ont été renforcées. Mais suivant l'objectif de réduction visé, il faudrait les rendre encore plus sévères et ne construire plus que des maisons zéro énergie ou même à énergie positive. Les bâtiments existants représentent un défi spécifique : le taux de rénovation annuel d'environ un pour cent actuellement est trop bas pour atteindre les objectifs de réduction de la Stratégie énergétique 2050. Ceux-ci requièrent un taux de rénovation de deux pour cent environ et l'assainissement complet des bâtiments concernés (installations techniques du bâtiment, façade, fenêtres et toit). Or aujourd'hui, les anciennes constructions ne font souvent l'objet que d'une réhabilitation partielle.

### Transports : les voitures de tourisme viennent en tête pour les émissions

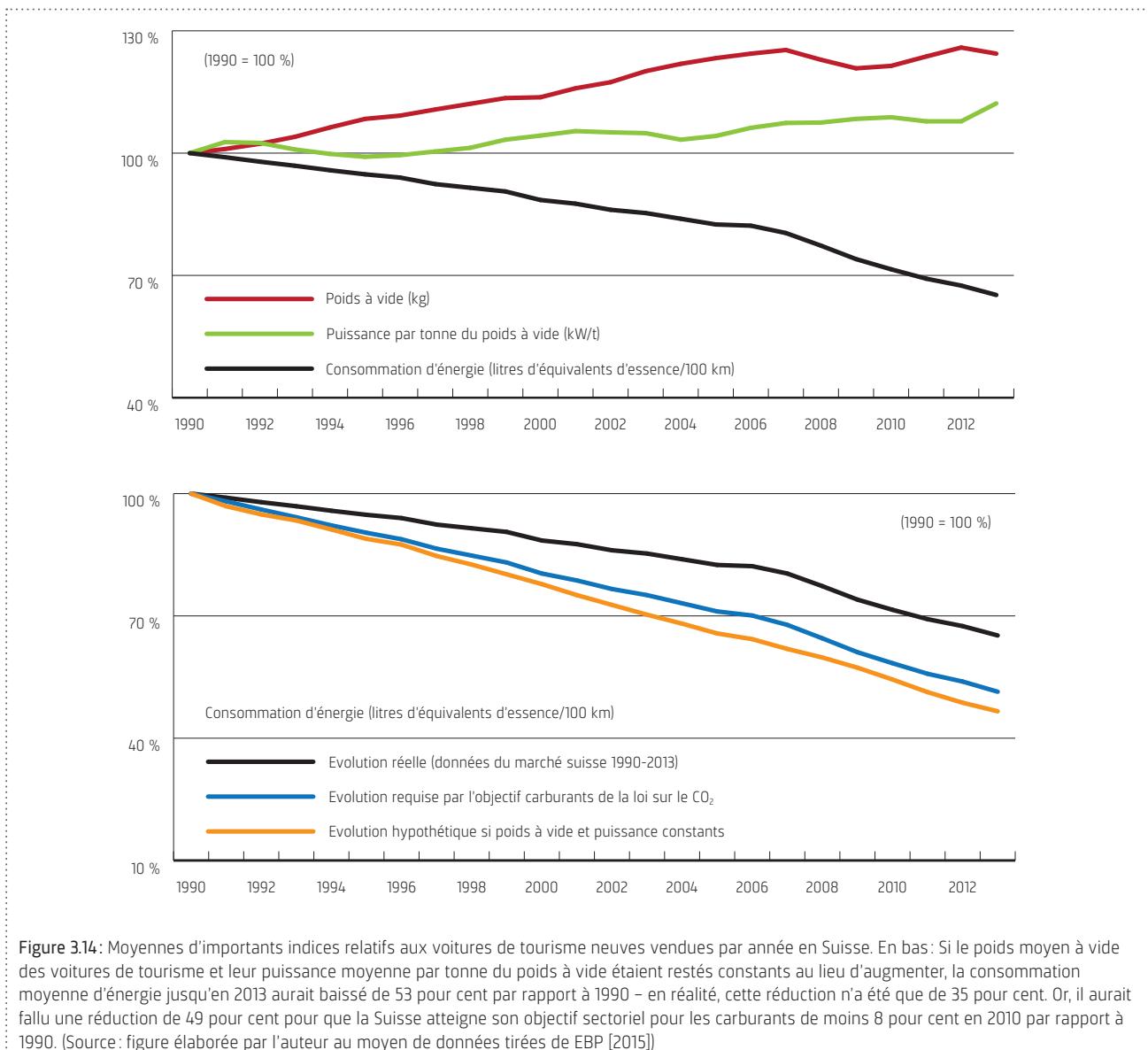
Chaque bâtiment est unique et les procédés de fabrication industriels et artisanaux impliquent souvent des solutions sur mesure. En revanche, les véhicules routiers sont largement standardisés. Pour être admis sur le marché, ils doivent satisfaire à de nombreuses prescriptions. Un type donné de véhicule peut alors être vendu en grand nombre sans autre contrôle dans tous les pays européens. Dans le secteur des transports, les voitures de tourisme

### Exploiter les innovations pour réduire les émissions

L'homme est innovateur et inventif, si bien que presque toutes les techniques font constamment des progrès. Pour presque chaque technique, il existe en quelque sorte un «potentiel annuel d'innovation» relatif à la réduction de la consommation d'énergie. Il ne s'agit d'abord que d'un potentiel. Car étant donné les prix actuellement très bas de l'énergie, le progrès technique est souvent exploité pour obtenir, au même coût, des produits plus gros, plus rapides et plus performants, plutôt que plus efficaces du point de vue énergétique. C'est pourquoi les prestataires de biens et de services devraient être obligés d'exploiter ledit potentiel d'innovation entièrement pour réduire la consommation d'énergie, sans rendre pour autant les produits plus chers. De plus, on souhaiterait amener les consommateurs à opter pour ces produits.

### Les secteurs et leurs potentiels de réduction

Les secteurs les plus significatifs du point de vue des émissions directes de gaz à effet de serre sont l'habitat, les biens et services, ainsi que la mobilité. Au niveau international, les rejets de CO<sub>2</sub> de la production d'électricité ont également une importance capitale (cf. chap. 2.14 Consén-



viennent en tête en matière d'émissions avec une part de 76 pour cent des rejets de CO<sub>2</sub> du trafic routier en 2015 (OFEV 2010). L'UE et la Suisse visent à exploiter le potentiel maximal de réduction des émissions et fixent à cette fin un objectif d'efficacité exprimé en grammes de CO<sub>2</sub> par kilomètre en moyenne sur toutes les voitures neuves vendues.

Dans le secteur des transports, des objectifs de réduction ambitieux exigeraient un recours accru aux véhicules électriques alimentés en courant renouvelable et une politique favorisant le transfert de la mobilité vers les transports publics, le système de déplacement le plus efficace du point de vue énergétique.

## Le secteur de l'industrie et de l'artisanat

Le secteur de l'industrie et de l'artisanat – contrairement aux voitures, appareils ménagers et composants de maisons d'habitation – ne fait pas appel à des techniques uniformes dont la consommation d'énergie pourrait être optimisée en bloc. Les potentiels techniques de réduction se répartissent entre de très nombreuses applications individuelles spécifiques aux procédés. C'est pourquoi les instruments politiques s'appliquant à ce secteur mettent l'accent sur des mécanismes de marché et laissent chaque entreprise décider quels potentiels de réduction des émissions elle entend exploiter en premier. Ceci permet aux entreprises de recourir à des techniques à faibles émissions uniquement dans certaines installations de pro-

duction. En outre, elles peuvent négocier des certificats d'émission avec d'autres entreprises.

Dans le secteur de l'industrie et de l'artisanat, l'exploitation du potentiel technique de réduction est stimulée par l'intégration de la grande industrie dans le système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE) ou de la Suisse (SEQE-CH). Le SEQE suisse regroupe les principaux émetteurs du pays; les droits d'émission leur sont attribués en fonction de la performance moyenne des installations les plus efficaces; cette manière de faire tient pleinement compte de l'évolution de la technique. D'autre part, de très nombreuses firmes concluent avec l'Office fédéral de l'environnement des conventions d'objectifs librement consenties: en contrepartie de l'exemption de la taxe sur le CO<sub>2</sub>, elles réalisent des mesures techniques de réduction qui ne sont pas rentables. La mise en œuvre de ces mesures est contrôlée par des audits spécialisés.

## Navigation et aviation

En matière de navigation, l'Organisation maritime internationale de l'ONU a fixé des minimums d'efficacité énergétique. Ils sont définis par les quantités de CO<sub>2</sub> produites pour une puissance propulsive donnée et s'appliquent depuis 2013 à tous les nouveaux bateaux. Ces normes d'efficacité doivent être renforcées tous les cinq ans. Une possibilité supplémentaire de réduire les émissions en matière de navigation est la diminution de la vitesse.

En comparaison des autres moyens de transport, l'aviation internationale ne dispose que d'un faible potentiel technique de réduction des émissions. Les grandes quantités de carburant embarqué accroissent la consommation, raison pour laquelle les constructeurs d'avions sont depuis des décennies attentifs à l'efficacité énergétique. Entre 1990 et aujourd'hui, la consommation de carburant des avions a diminué de plus de 40 pour cent à 3 litres par 100 sièges-kilomètre pour les vols long-courriers, ceci grâce à la diminution du poids des appareils et à l'amélioration de l'aérodynamique et des moteurs. L'évitement des files d'attente, l'adaptation des procédures de décollage et d'atterrissement de manière à mieux exploiter le vol plané, l'augmentation du taux d'occupation et les opérations au sol (transports du tarmac aux docks et pour approvisionner les avions) offrent des potentiels supplémentaires de réduction des émissions. L'Organisation de l'aviation civile internationale de l'ONU estime que des hausses de l'efficacité de 2 pour cent par an sont possibles pendant les 15 prochaines années. Mais selon les prévisions, le trafic aérien mondial connaîtra une progression annuelle de 5 pour cent, si bien que les émissions de CO<sub>2</sub> des transports aériens augmenteront chaque année de 3 pour cent. C'est pourquoi l'UE a intégré tous les vols intra-EEE dans le sys-

tème d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE); cette mesure sera compensée dans d'autres secteurs par des coûts marginaux d'évitement plus bas. La Commission de l'UE mène des négociations internationales en vue d'intégrer, à partir de 2017, tous les vols au départ ou à destination de l'EEE dans le SEQE-UE – au moins pour le trajet au-dessus du territoire de l'EEE.

## Le Protocole de Montréal est important pour la protection du climat

Les hydrocarbures partiellement halogénés, qui ne sont pas soumis au Protocole de Kyoto, ont également une grande importance. Ce sont des produits de substitution des hydrochlorofluorocarbures (HCFC) qui ont été interdits par le Protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone. Ces substituts ont en partie un très haut potentiel d'effet de serre. Etant donné qu'élargir le Protocole de Montréal est selon toute attente plus facile que mettre en œuvre celui de Kyoto, il est judicieux de prendre des mesures au sujet des hydrocarbures partiellement halogénés dans le cadre du Protocole de Montréal.

## Les potentiels techniques seraient théoriquement suffisants

Dans l'ensemble, il apparaît que les potentiels techniques de réduction des émissions sont théoriquement suffisants pour atteindre des objectifs de réduction même ambitieux. Le défi consiste à réaliser ces potentiels. Il est donc nécessaire – mais pas suffisant – d'imposer les meilleures techniques disponibles systématiquement comme standards. Il faut en outre influencer les moteurs de la demande ou limiter les émissions totales et les soumettre à un système d'échange de quotas d'émission. A noter que l'augmentation pronostiquée des émissions du trafic aérien pourrait réduire à néant les réductions obtenues dans d'autres secteurs.

## Bibliographie

EBP (2015) *Energieverbrauch und Energieeffizienz der neuen Personewagen 2014*. 19. Berichterstattung im Rahmen der Energieverordnung, 11 juin 2015, 45 pp.

OFEV (2010) *Emissions polluantes du trafic routier de 1990 à 2035*. Mise à jour 2010. OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1021: 130 pp.

## 3.7 Agriculture, foresterie et autres affectations des terres

**Le secteur AFAT (agriculture, foresterie et autres affectations des terres) est responsable, de par le monde, de près d'un quart des émissions de gaz à effet de serre dues à l'homme. Un peu plus de la moitié revient à l'agriculture (12 pour cent) et le reste à la foresterie et aux autres affectations des terres. Les principales causes sont la déforestation (principalement dans les zones tropicales), les émissions de méthane provenant de l'élevage animal, l'assèchement des zones marécageuses ainsi que les émissions d'azote dues à l'utilisation d'engrais. En Suisse, près de 12 pour cent de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre sont engendrés par l'agriculture. L'alimentation humaine peut jouer un rôle-clé dans leur réduction, en Suisse comme ailleurs.**

*Carmenza Robledo Abad (EPF de Zurich), Daniel Bretscher (Agroscope), Jens Leifeld (Agroscope)*

### Emissions mondiales

A l'échelle mondiale, le secteur AFAT (cf. encadré) est responsable de près de 25 pour cent des émissions annuelles de gaz à effet de serre dues à l'homme.<sup>1</sup> A l'inverse de la période 1990-1999, les émissions de gaz à effet de serre du secteur AFAT ont bissé entre 2000 et 2009 malgré une augmentation mondiale de l'élevage animal, de l'utilisation d'engrais et de la population. Cette baisse est liée avant tout à un ralentissement de la déforestation dans certaines zones (en particulier au Brésil). Malgré tout, la déforestation (prioritairement dans les zones tropicales), les émissions de méthane ( $\text{CH}_4$ ) provenant de l'élevage animal, les émissions de  $\text{CO}_2$  dues au assèchement des marais et les émissions de gaz hilarant ( $\text{N}_2\text{O}$ ) liées aux engras restent les principales sources de gaz à effet de serre dans le secteur AFAT (fig. 3.15).

#### AFAT

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGIII/Chap.11) traite pour la première fois, ensemble, de l'agriculture, de la foresterie et des autres affectations des terres en les réunissant sous l'acronyme AFAT (agriculture, foresterie et autres affectations des terres). Il est ainsi plus facile de considérer de manière complète et systémique les possibilités de réduction des émissions dans ce secteur et de quantifier les économies possibles correspondantes.

### Les émissions en Suisse

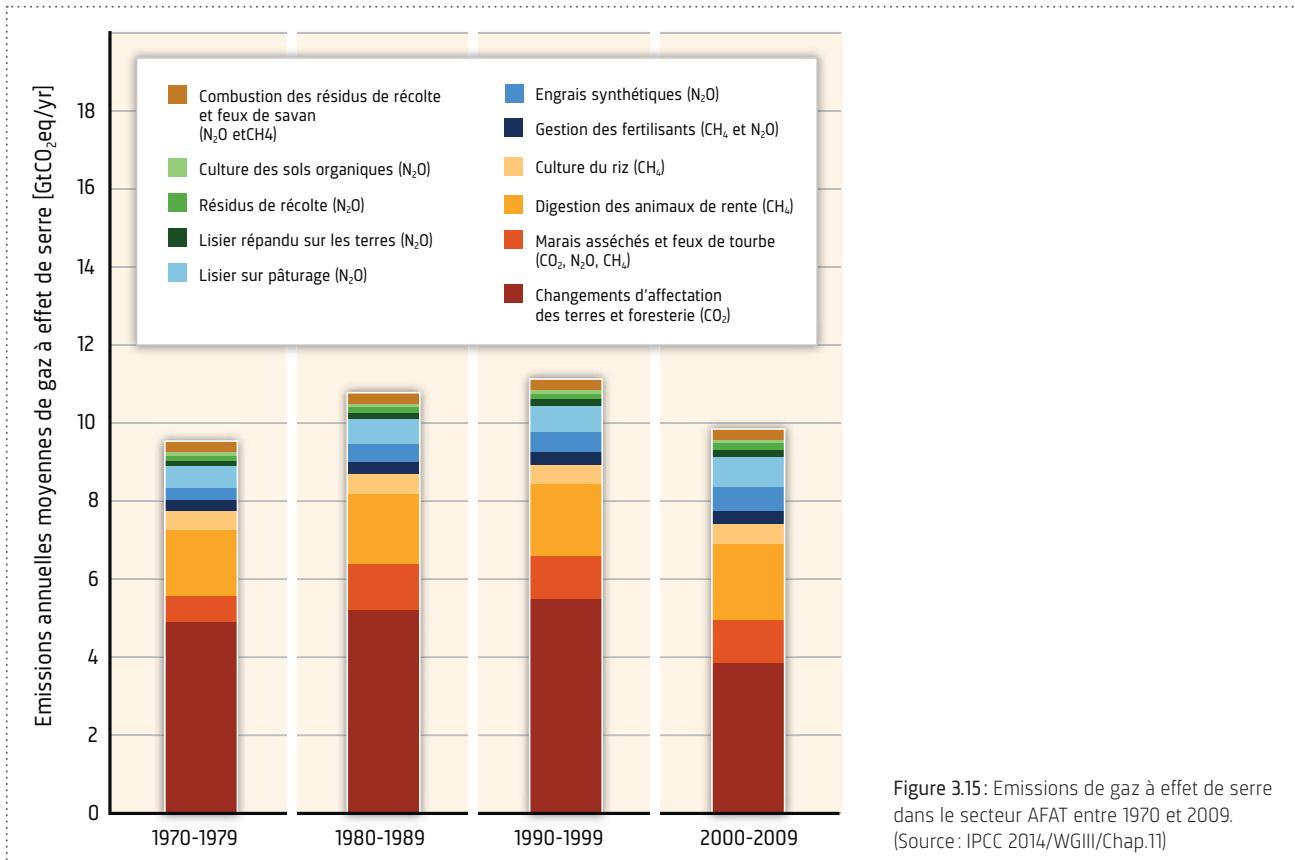
#### L'agriculture : baisse des émissions grâce à une diminution du cheptel bovin et de l'utilisation d'engrais

Entre 2000 et 2010, la Suisse a produit en moyenne 52 millions de tonnes d'équivalent  $\text{CO}_2$  par an dont environ 12 pour cent reviennent à l'agriculture. Ces émissions agricoles se composent principalement de méthane provenant de la digestion des animaux de rente (54 pour cent) et de gaz hilarant émanant des sols fertilisés (26 pour cent). Pour ces deux gaz, les émissions provenant du stockage du lisier jouent également un rôle important (19 pour cent).

Une analyse plus détaillée du secteur agricole montre que les émissions directes de gaz à effet de serre y ont baissé de 8 pour cent sur les 25 dernières années alors que parallèlement la production agricole a légèrement augmenté. Nous devons cette baisse, en premier lieu, à une réduction du cheptel de bovins et à une utilisation moindre des engras azotés rendue possible par une plus grande efficacité de l'azote. La baisse concerne surtout le début des années 1990. Depuis, les émissions de gaz hilarant sont restées stables. Les émissions de méthane sont le reflet de l'évolution du cheptel bovin : elles ont brièvement augmenté jusqu'en 2008 avant de retomber jusqu'au niveau de l'an 2000.

Outre les émissions qui lui sont directement attribuées par l'Inventaire national, le secteur agricole est concerné par d'autres émissions indirectes. Il s'agit en particulier des émissions grises liées à la fabrication de certains moyens de production (engrais, fourrages importés etc.). Ces émissions grises (provoquées par l'importation de produits alimentaires) jouent un rôle important pour le bilan de la consommation. Les émissions liées aux importations sont à peu près aussi élevées que les émissions directes de méthane et de gaz hilarant que l'Inventaire suisse sur les gaz

<sup>1</sup> Sauf indication contraire, les informations sur les émissions concernent la période 2000-2010. Source des données: cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGIII/Chap.11) et Inventaire suisse des émissions de gaz à effet de serre conformément au cahier des charges 2016 (OFEV 2016).



à effet de serre attribue au secteur agricole. Le total des émissions provenant de l'agriculture et de l'alimentation n'a cessé d'augmenter depuis 1990 suite à l'accroissement de population, le taux d'émissions par personne étant resté stable. Nous pouvons ainsi en déduire que l'alimentation humaine, au-delà de l'agriculture en tant que telle, joue un rôle-clé dans l'identification et l'évaluation des mesures visant à réduire les émissions.

### La foresterie: la biomasse forestière augmente en Suisse

En foresterie, les émissions de CO<sub>2</sub> sont avant tout décrites sous la forme de modifications dans les réserves de carbone des écosystèmes, c'est-à-dire de bilans bénéfices-pertes. L'accroissement de la biomasse forestière a une influence positive sur le bilan suisse des gaz à effet de serre, car la compensation qu'elle représente est bien plus élevée que les pertes dues à la récolte du bois et/ou aux chablis. En fin de compte, la foresterie suisse a ainsi agi comme un puits de CO<sub>2</sub> en compensant en moyenne, entre 2000 et 2010, 1,9 million de tonnes de CO<sub>2</sub>, soit près de 3,4 pour cent de toutes les émissions suisses.

### (Une modification de) l'affectation des terres joue un rôle secondaire en Suisse

En raison de la stabilité que connaît l'affectation des terres en Suisse, les changements dans ce domaine jouent un rôle nettement secondaire pour les émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'échelle internationale. Il existe cependant toujours de grandes incertitudes dans l'évaluation des sources et des puits de CO<sub>2</sub> dans les sols agricoles. Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de sols marécageux asséchés et utilisés par l'agriculture représentent ici une source importante avec près de 0,6 million de tonnes de CO<sub>2</sub> (cf. encadré Les zones humides : sources de méthane ou de CO<sub>2</sub> 1, p. 185).

### Potentiel d'atténuation à l'échelle planétaire

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC analyse les possibilités de réduire les émissions dans le secteur AFAT en séparant les mesures concernant l'offre (agriculture et foresterie) et celles concernant la demande (produits alimentaires, utilisation du bois; tabl. 3.1). Une réduction des émissions du côté de la demande, mais aussi

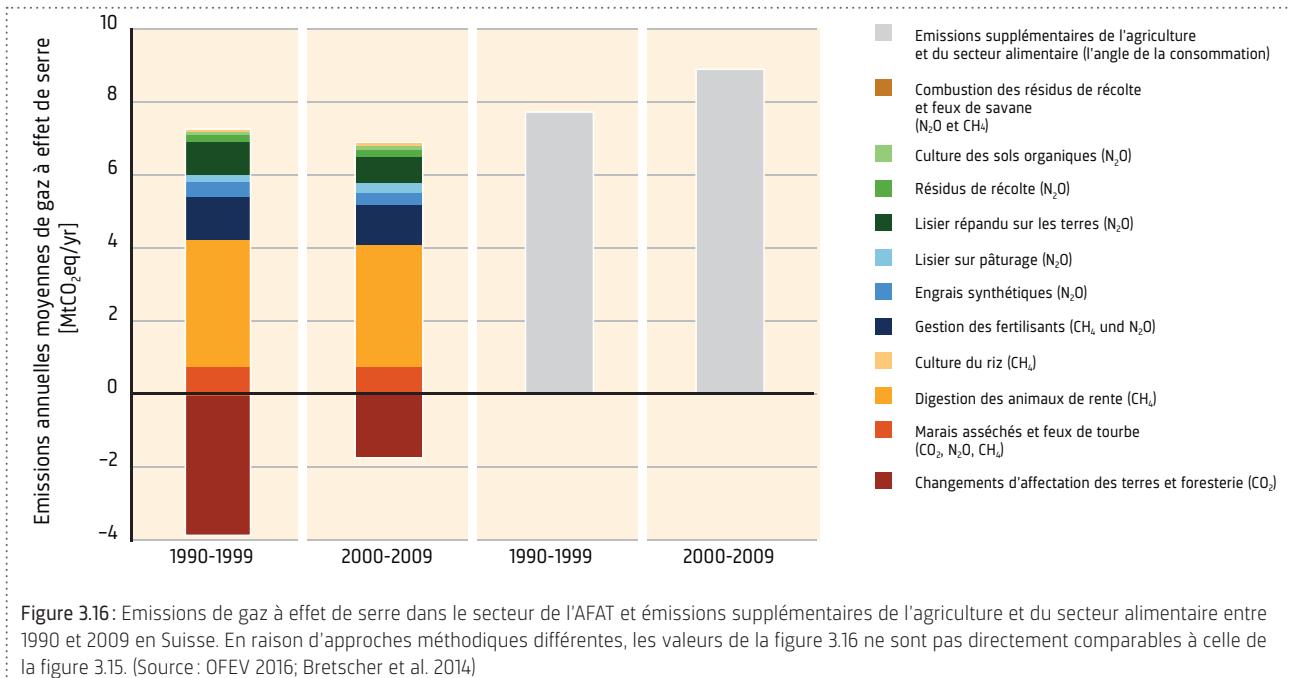


Figure 3.16: Emissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'AFAT et émissions supplémentaires de l'agriculture et du secteur alimentaire entre 1990 et 2009 en Suisse. En raison d'approches méthodologiques différentes, les valeurs de la figure 3.16 ne sont pas directement comparables à celle de la figure 3.15. (Source: OFEV 2016; Bretscher et al. 2014)

du stockage exige une modification du comportement de consommation à différents niveaux.

Du côté de l'offre, le potentiel économique de réduction du secteur AFAT est évalué, à l'horizon 2030, à 7,2-11 milliards de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub>. Le prix d'une tonne d'équivalent CO<sub>2</sub> économisée est estimé pouvoir atteindre 100 USD. Environ un tiers de ce potentiel pourrait être épargné à un prix inférieur à 20 USD par tonne d'équivalent CO<sub>2</sub>. Les mesures de réduction côté demande recèlent un potentiel très prometteur avec 0,76-8,6 milliards de tonnes d'équivalent CO<sub>2</sub> par an jusqu'en 2050. De grandes incertitudes demeurent en ce qui concerne la mise en œuvre de ces mesures au niveau de la politique sociétale. Par ailleurs, la production d'énergie à partir de la biomasse peut jouer un rôle essentiel dans cette réduction dès lors que les aspects de durabilité, tels que les effets sur la production alimentaire ou la biodiversité, sont pris en compte.

## Potentiel d'atténuation en Suisse

De manière analogue à la situation mondiale, les potentiels de réduction se situent, pour la Suisse, aussi bien du côté des mesures techniques dans le domaine de l'offre (agriculture et foresterie) que du côté de la demande. En ce qui concerne l'agriculture, la Stratégie Climat de l'Office fédéral de l'agriculture ambitionne une réduction des émissions agricoles de gaz à effet de serre d'un tiers (par des mesures techniques et organisationnelles au ni-

veau de la production agricole) et de deux tiers au niveau de la consommation jusqu'en 2050 (par rapport à 1990). Les émissions peuvent baisser, par exemple, grâce à une amélioration de l'efficacité de l'azote, une alimentation équilibrée des animaux de rente, une optimisation de la gestion du cheptel (en particulier des ruminants) ou une réduction des besoins en agents énergétiques fossiles. Actuellement cependant, il est encore incertain dans quelle mesure ces potentiels peuvent être mis en place et atteints de manière efficace et vérifiable. Influencer les processus biochimiques sous-jacents qui y sont généralement étroitement liés s'avère, dans la pratique, très difficile. Par ailleurs, le déplacement possible des émissions au sein des chaînes de processus, les effets secondaires indésirables (transfert de pollution) ou le risque de baisses de production représentent d'importants défis.

Les émissions de gaz à effet de serre peuvent également être évitées grâce à des mutations au niveau de la demande ainsi qu'une réduction des pertes alimentaires (normes de produits, stockage, transport, foyers). Les différents taux d'émission par kilogramme d'aliment produit représentent, en particulier, un potentiel de réduction important. Les produits animaux ont une influence généralement bien plus élevée sur les changements climatiques que les produits végétaux. Dans les pays où la consommation d'aliments animaux est élevée, comme en Suisse, une alimentation plus végétarienne serait souhaitable. Etant donné les restrictions qui limitent les possibilités de réduction sur le plan technique et organisationnel du

| Côté offre   | Mesures  |
|--|--|
| Foresterie   | Diminution de la déforestation   |
|  | Reboisement et reforestation   |
|  | Sylviculture   |
|  | Protection des forêts secondaires  |
| Culture des végétaux   | Culture des champs (plantations, engrais, préparation des sols, irrigation, culture du riz, remise en eau des sols organiques, jachères, utilisation du charbon végétal) |
|  | Exploitation des prairies (végétation, élevage, utilisation du feu)  |
|  | Revégétalisation des surfaces sans végétation  |
|  | Renaturalisation des surfaces organiques   |
| Elevage  | Meilleure efficacité de l'utilisation des engrais  |
|  | Optimisation de l'alimentation destinée aux bêtes  |
|  | Optimisation de l'utilisation du cheptel (p.ex.: sélection, gestion du cheptel, santé des animaux, système d'étables et de pâturage)                                     |
|  | Meilleure utilisation des fertilisants agricoles   |
| Systèmes intégrés  | Culture agro-sylvicole   |
|  | Exploitations mixtes, cultures intermédiaires  |
|  | Utilisation multiple de la biomasse  |
| Généralités  | Conservation des puits de carbone existants  |
| Bioénergie   | Culture ciblée de plantes énergétiques efficaces   |
|  | Production d'énergie à partir des résidus agricoles et sylvicoles ainsi que des déchets organiques industriels   |
| <b>Côté demande</b>  |  |
| Diminution du gâchis alimentaire   |  |
| Modification des habitudes alimentaires vers des produits qui occasionnent moins d'émissions |  |
| Utilisation à long terme du bois, utilisation de bois provenant d'une sylviculture certifiée |  |

**Tableau 3.1:** Mesures mondiales de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur de l'AFAT. Ces mesures sont réparties selon qu'elles concernent l'offre ou la demande. L'importance de chaque mesure varie d'une région à l'autre. Par exemple, un ralentissement de la déforestation est très important dans les régions aux forêts denses telles que le bassin du Congo ou celui de l'Amazonie, tandis que la renaturalisation des sols organiques joue un rôle essentiel dans certains pays européens (cf. encadré Les zones humides : sources de méthane ou de CO<sub>2</sub> 1, p. 185). (Source : IPCC 2014/WGIII/Chap.11)

secteur AFAT (cf. ci-dessus), les mesures côté demande s'avèrent particulièrement importantes.

La foresterie et les autres affectations des terres permettent de stocker le CO<sub>2</sub> atmosphérique sous la forme de biomasse ou de séquestration du carbone dans le sol.

Etant donné les surfaces relativement vastes consacrées à l'agriculture et aux forêts, des changements relativement petits dans les flux de carbone pourraient avoir de grandes conséquences. La fonction de puits dont se chargent les forêts et les sols minéraux est cependant limitée dans le temps, jusqu'à ce que le stock maximal de biomasse et du taux de carbone est atteint (cf. chap. 2.9 La forêt, p. 106). Par ailleurs, l'emprisonnement du CO<sub>2</sub> est à tout moment réversible. En théorie du moins, l'utilisation des sols organiques (utilisation extensive ou arrêt de leur exploitation) renferme un grand potentiel. En raison du déficit de données, il est très difficile de définir la taille réelle du puits potentiel théorique et effectivement applicable en Suisse. Ce point fait l'objet actuellement de recherches.

La production d'énergie à partir d'agrocarburants joue en Suisse un rôle secondaire en raison des surfaces utilisées par les autres secteurs. En revanche, la production et l'utilisation des énergies renouvelables (photovoltaïque, énergie éolienne, bois, méthanisation du lisier et biomasse) renferment des potentiels de réduction supplémentaires dans les exploitations agricoles et forestières.

| Dimension        | Aspects  |
|------------------|--|
| Institutionnelle | Questions liées à la propriété et à l'affectation          |
|                  | Mise en œuvre des directives politiques                    |
|                  | Coordination intersectorielle                              |
| Sociale          | Sécurité alimentaire                                       |
|                  | Santé publique   |
|                  | Protection des animaux                                     |
|                  | Egalité des droits   |
| Economique       | Acquisition de grandes surfaces de terre                   |
|                  | Diversification des revenus                                |
|                  | Emploi   |
| Environnementale | Mécanismes de financement                                  |
|                  | Disponibilité de la terre et utilisation de la concurrence |
|                  | Biodiversité, eau, sol                                     |
|                  | Stabilité des écosystèmes                                  |
| Technique        | Accès aux infrastructures                                  |
|                  | Transfert technologique                                    |
|                  | Acceptation des techniques                                 |

**Tableau 3.2:** Dimensions prises en compte pour un développement durable. (Source : IPCC 2014/WGIII/Chap.11)

## AFAT et développement durable à l'échelle mondiale

Le secteur AFAT joue un rôle central pour un développement durable à l'échelle de la planète. La population mondiale vit pour moitié en zone rurale. Elle est ainsi généralement tributaire de l'agriculture et/ou de la foresterie. Le cinquième Rapport d'évaluation souligne ainsi le caractère systémique des mesures d'atténuation dans le secteur AFAT. C'est pourquoi le GIEC étudie les mesures de l'AFAT sous un angle institutionnel, social, économique, environnemental et technique (tabl. 3.2) en insistant sur leurs interactions. Par exemple, une reforestation est plus facile à réaliser si les questions de propriété sont résolues et peut, parallèlement, contribuer à résoudre les conflits éventuels concernant les droits de propriété.

L'étendue des effets de ces différentes mesures sur le développement durable varie d'une région à l'autre et dépend du contexte local, de la surface totale, de la vitesse des mutations techniques et du type d'affectation des sols. Le rapport souligne également l'importance d'une gestion responsable des affaires publiques (bonne gouvernance) comme facteur central pour un développement durable.

En raison du commerce mondial, de la collaboration internationale et de la consommation privée directe de produits importés, la Suisse est étroitement liée au développement durable mondial. Dans ce contexte, agir de manière responsable en ce qui concerne les mesures d'adaptation et d'atténuation dans les questions climatiques est d'une importance similaire.

## Bibliographie

- Brettscher D, Leuthold-Stärfl S, Felder D, Fuhrer J (2014) **Emissions de gaz à effet de serre dans l'agriculture et la filière alimentaire en Suisse**. Recherche Agronomique Suisse 5: 458–465.
- IPCC (2013) **Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)**. Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg1](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)**. Chapter 11 «Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Joosten H (2010) **The global peatland CO<sub>2</sub> picture**. Peatland status and drainage related emissions in all countries of the world. Ede, The Netherlands: Wetlands International, 36 pp.
- Leifeld J (2013) **Prologue paper: Soil carbon losses from land-use change and the global agricultural greenhouse gas budget**. Science of the Total Environment 465: 3–6.
- OFEV (2016) **Switzerland's Greenhouse Gas Inventory 1990–2014. National Inventory Report**. Including reporting elements under the Kyoto Protocol. Submission of 15 April 2016 under the United Nations Framework Convention on Climate Change and under the Kyoto Protocol, 629 pp.

## Les zones humides: sources de méthane ou de CO<sub>2</sub>

A l'échelle mondiale, les zones humides, en particulier les zones marécageuses, stockent près d'un tiers du carbone organique présent dans les sols, et ce alors qu'elles ne représentent qu'environ trois pour cent des surfaces totales. Si les marais sont naturels, le carbone y reste stocké plusieurs milliers d'années. La conservation des zones marécageuses encore intactes représente donc une solution efficace pour limiter, à l'avenir, les émissions de CO<sub>2</sub> du secteur AFAT. Si en revanche, les marais sont asséchés pour être transformées en terres agricoles ou sylvicoles ou pour récolter la tourbe, cela implique une décomposition microbienne rapide et irréversible de la tourbe en libérant de grandes quantités de CO<sub>2</sub> et, à plus petite échelle, de gaz hilarant (N<sub>2</sub>O). A l'échelle mondiale, environ dix pour cent des zones marécageuses sont asséchées. Ce taux atteint toutefois près de 50 pour cent en Europe et plus de 90 pour cent en Suisse. Une renaturation de ces marais dégradés peut renverser le bilan négatif des gaz à effet de serre, toutefois au prix d'un abandon de leur exploitation. En Suisse, la part des sols marécageux dégradés se trouvant sous des terres arables ou des prairies est estimée inférieure à un pour cent.

## 3.8 Stratégies urbaines face au changement climatique

**Plus de la moitié de la population mondiale vit dans des villes et selon certaines estimations cette proportion atteindra presque 70 pour cent d'ici 2050; en Suisse, on s'attend même à un taux de 80 pour cent. L'augmentation de la densité de population, de bâtiments et d'infrastructures accroîtra la vulnérabilité des villes suisses. Mais l'urbanisation recèle d'autre part un grand potentiel de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre, avant tout par des mesures en matière d'aménagement du territoire et des infrastructures et par l'assainissement du parc immobilier. Il faut promouvoir les espaces urbains compacts à usage mixte, habités par un mélange de population, caractérisés par de courtes distances d'approvisionnement et bien dotés en voies piétonnes et pistes cyclables. L'assainissement du parc immobilier suisse et des infrastructures existantes permettrait de réduire les émissions de 50 à 80 pour cent par rapport au niveau de référence de 1990.**

Adrienne Grêt-Regamey (EPF de Zurich), Jean-Louis Scartezzini (EPF de Lausanne)

Les villes sont responsables de deux tiers de la consommation d'énergie de la planète et de plus de 70 pour cent des émissions de gaz à effet de serre (GEA 2012). En même temps, l'urbanisation avance à pas de géant: selon toutes prévisions, la population urbaine atteindra plus de six milliards d'êtres humains d'ici 2050, ce qui représentera deux tiers des habitants du globe. La Suisse ne fera pas exception: plus de 80 pour cent de sa population – qui aura atteint, selon les estimations, 10,2 millions d'habitants (OFS 2014) – vivra dans des villes (United Nations 2014). Aujourd'hui, cette évolution a lieu surtout dans des agglomérations de petite à moyenne taille, dans lesquelles la surface habitable augmente deux fois plus vite que la population résidente (OFS 2015). La surface habitable moyenne par personne à Zurich, Genève et Lausanne, de 40 mètres carrés est nettement inférieure à la moyenne suisse de 45 mètres carrés (UVS 2016). En Suisse, 30 pour cent des émissions sont actuellement imputables aux bâtiments et 55 pour cent de l'énergie consommée dans ces constructions proviennent de sources d'énergie fossile. La demande accrue d'énergie dans le secteur des ménages est attribuable pour l'essentiel à l'augmentation des surfaces habitables chauffées.

### L'urbanisation rapide en tant que chance

Etant donné que les rejets de gaz à effet de serre des espaces urbains dépendent fortement de la structure de l'habitat et des infrastructures, l'urbanisation rapide recèle l'une des plus grandes chances de réduire la consommation d'énergie et les émissions qui en découlent. Mais les possibilités de réaliser ces réductions varient selon le type et l'état de développement de l'espace urbain considéré. Dans le milieu bâti en rapide développement, l'orientation générale de la planification urbaine et des infrastructures peut encore être influencée. Dans les sites déjà développés, la principale possibilité consiste à assainir le parc immobilier existant.

### L'aménagement du territoire et des infrastructures

Un rôle déterminant pour la réduction des émissions incombe à l'aménagement du territoire et des infrastructures. Jusqu'ici, l'aménagement du territoire s'est préoccupé du changement climatique, avant tout sur un plan sectoriel, dans le domaine des dangers naturels. Mais en tant que domaine transversal, il dispose aujourd'hui déjà d'une large palette d'instruments appropriés pour combattre le changement climatique.

### Possibilités d'action en matière de changement climatique

A part les plans directeurs, plans d'affectation ou autres plans d'aménagement qui définissent la structure de l'espace urbain, la mise en œuvre de programmes d'agglomération, concepts généraux, modèles de développement régional ou projets pilotes peut avoir une influence indirecte significative sur le climat. Cependant, l'aménagement du territoire permet avant tout de créer des synergies, en coordonnant différentes tâches sectorielles lorsqu'il existe des intérêts convergents entre champs d'action classiques et nouveaux relevant du climat, par exemple entre la qualité de l'air, la ventilation naturelle dans les villes et le développement des espaces verts. L'aménagement du territoire et des infrastructures devrait avoir pour objectif le fait qu'habiter en ville continue d'offrir des conditions de vie adéquates, en dépit des changements annoncés du climat urbain et du régime hydrologique. Il devrait aussi veiller à ce que l'effet d'îlot de chaleur urbain, qui se manifeste déjà aujourd'hui (cf. chap. 2.13 L'espace urbain, p. 126), ne conduise pas à des situations totalement inconfortables ou mettant même la vie en danger. Nous présentons ci-après les principaux domaines dans lesquels l'aménagement du territoire et des infrastructures peut intervenir pour atténuer les effets du changement climatique (fig. 3.18).

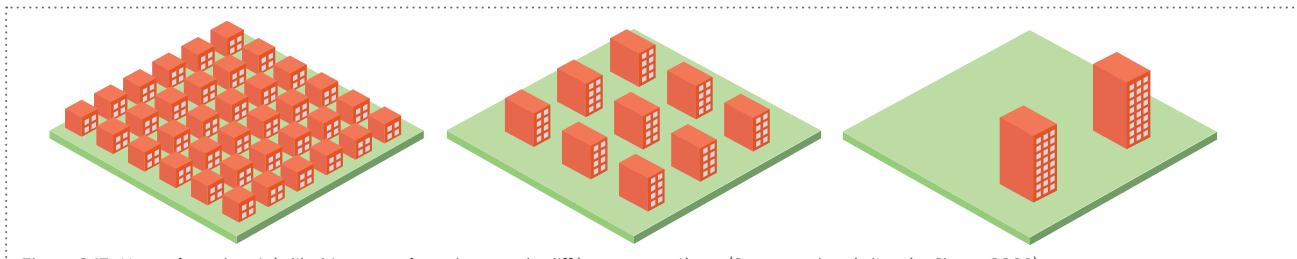


Figure 3.17: Une même densité d'habitat peut être obtenue de différentes manières. (Source: adapté d'après Cheng 2009)

### L'habitat compact

Dans les villes déjà développées, la promotion de l'**habitat compact** est une mesure élémentaire de réduction des émissions. Une haute densité de population, de lieux de travail et de commerces va de pair avec de courtes distances de transport et avec de plus faibles émissions de gaz à effet de serre. Plus cette densité est élevée, plus grande est la proportion de déplacements à pied et à vélo (Metron 2014). Toutefois, une forte densification pourrait aussi conduire à une augmentation du trafic de loisirs. On pense souvent qu'une densification s'obtient en multipliant le nombre d'étages des bâtiments. Ceci n'est toutefois pas toujours la meilleure solution, s'il s'agit d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les émissions, car les constructions élevées doivent être suffisamment espacées pour permettre le captage de la chaleur et de lumière solaire (fig. 3.17).

### L'usage mixte

Un **usage mixte** favorise aussi les trajets courts, ce qui favorise à son tour des moyens de transport écologiques. Des effets négatifs, tels que le bruit et autres nuisances (poussières, émanations etc.) qui justifiaient à l'origine la séparation stricte entre zones artisanales, industrielles et d'habitation, peuvent être limités aujourd'hui.

### La densité du réseau de transport

La densité du réseau de transport a une influence majeure sur la réduction des émissions et favorise l'accessibilité. Cet aspect a une grande importance, car 32 pour cent des rejets de gaz à effet de serre sont imputables aux transports. Dans un réseau de transport dense, comportant de nombreuses pistes et chemins pour les différents usagers, davantage de personnes se déplacent à pied ou à vélo, ce qui a un effet positif sur les émissions. Lors de nouvelles constructions, un réseau dense s'obtient en compartimentant le site. Les voies de transports existantes peuvent être réaménagées en ajoutant des zones piétonnes, en créant des pistes cyclables ou en prenant des mesures de modération du trafic (zone à 30 km/h).

### Infrastructures vertes et bleues

Les infrastructures vertes et bleues concourent à créer un climat plus agréable, à une meilleure qualité de l'air et offrent des sites de détente tout proches. Les infrastructures vertes comprennent la végétation et les zones de verdure

urbaines. Ces dernières vont des parcs et forêts aux tracés de trams et aires de stationnement recouverts d'herbe. Les toitures et façades vertes, ou encore le jardinage urbain, font également partie des infrastructures vertes. Les infrastructures bleues sont les éléments aquatiques à l'intérieur de la ville: les rivières et les lacs, les fontaines, les douves ou autres sources d'humidité et de fraîcheur. Elles contribuent aussi au bien-être des habitantes et habitants (OFEV 2012) (cf. encadré Les arbres dans l'espace urbain, p. 108). Il faudrait les prendre en considération dans l'aménagement du territoire et des infrastructures. Dans tout l'espace urbain, les couloirs amenant de l'air frais aux centres-villes doivent être recensés et préservés, et leur fonction développée et améliorée. Lors de futures constructions (seulement en dehors de zones inondables par des crues centennales) ou de transformations de bâtiments au bord de plans et de cours d'eau, les édifices devraient être orientés de manière à permettre à l'air frais de pénétrer à l'intérieur des zones bâties. L'examen des conditions climatiques locales devrait porter notamment sur les liens avec les systèmes régionaux d'air froid et d'air frais, car ils agissent le plus souvent dans un périmètre qui s'étend bien au-delà de la zone urbaine.

Un approvisionnement énergétique durable, recourant en majeure partie à des ressources renouvelables, offre encore d'autres possibilités de réduire efficacement les émissions dans les villes. La demande d'énergie peut être réduite en améliorant l'efficience des réseaux de distribution, des bâtiments (cf. paragraphe suivant) ainsi que des équipements et des installations techniques. Une prise de conscience et un changement de comportement des habitants peuvent également conduire à une réduction de la demande (cf. chap. 3.3 Réduction des émissions – changements de comportement, p. 164). Les potentiels d'économie estimés atteignent jusqu'à 20 pour cent à court terme et 50 pour cent d'ici 2050 (IPCC 2014/WGIII/Chap.12).

### Facteurs clés pour une mise en œuvre efficace des mesures de réduction

Les stratégies et les mesures échouent souvent au moment de leur concrétisation. Les facteurs suivants jouent un rôle clé dans la mise en œuvre de mesures de réduction prises en matière d'aménagement du territoire et des infrastructures:

|                                  | Grandeurs à mesurer   | Domaines  |   |
|----------------------------------|---|---|---|
|                                  |   | Fortes émissions  | Faibles émissions   |
| Densification                    | - Ménages/population<br>- Bâtiments/coefficient d'occupation du sol<br>- Emplois/activités commerciales<br>- Bloc/parcelle<br>- Unité d'habitation  |     |     |
| Affectation mixte                | - Diversité d'utilisation du sol<br>- Diversité des emplois<br>- Equilibre emplois/habitat<br>- Equilibre emplois/population<br>- Nombre de magasins<br>- Possibilités de se déplacer à pied          |    |      |
| Réseau de transport              | - Densité de carrefours<br>- Grandeur des blocs<br>- Largeur des trottoirs<br>- Densité du réseau de rues   |     |     |
| Accessibilité                    | - Centralité de la population<br>- Distance jusqu'au quartier commercial du centre<br>- Accessibilité du lieu de travail en voiture et/ou avec les transports publics<br>- Accessibilité des magasins |     |     |
| Infrastructures vertes et bleues | - Disponibilité en espaces verts<br>- Circulation d'air froid<br>- Effet de refroidissement   |     |     |

Figure 3.18: Stratégies de réduction des émissions dans l'aménagement du territoire et des infrastructures. (Source: adapté d'après IPCC 2014/WGIII/Chap.12)

#### – La prise de conscience, la participation et la responsabilité régionale:

Les mesures de réduction des émissions doivent être intégrées dans les concepts existants de la ville durable, tels que la « Société à 2000 watts » ou « à une tonne de CO<sub>2</sub> ». La sensibilisation de l'administration communale et de la population joue un rôle clé à cet égard. Elle implique de reconnaître que l'on est soi-même concerné, d'associer des spécialistes à l'exécution de modèles décentralisés d'adaptation au changement climatique et d'indiquer des possibilités d'action concrètes dans des documents élaborés à l'attention de spécialistes de domaines spécifiques d'activité.

#### – La pensée systémique, la coordination des instruments et leur intégration:

L'aménagement régional du territoire gagne en importance en tant que plate-forme de dialogue et de coordination, parce que les stratégies d'adaptation ne se définissent pas en fonction des frontières communales ou cantonales, mais selon le type de climat et les conditions naturelles de l'habitat. Les interactions entre les planifications dans différents domaines spécifiques doivent être coordonnées de manière optimale sur la base des multiples fonctionnalités du paysage. Un exemple en ce sens: la révision de la loi fédérale sur la protection des eaux (LEaux) prévoit que les espaces réservés aux eaux soient

délimités en coordination avec les activités fédérales, cantonales et communales d'adaptation au climat de même qu'avec la stratégie sur la biodiversité.

– L'utilisation d'instruments informels: Il faudrait développer un mix d'instruments formels et informels conduisant à des effets complémentaires. Des instruments informels importants sont les réseaux régionaux composés de représentants des cantons et d'associations et organisations pertinentes en matière de planification, construction et entretien. De tels réseaux d'acteurs compétents offrent de nombreuses possibilités de promouvoir la prise de conscience, d'échanger des informations et de créer un pool d'idées régional.

## L'assainissement du parc immobilier et d'infrastructures existantes

L'assainissement du parc immobilier et des infrastructures existantes, en leur appliquant de nouveaux concepts d'autosuffisance énergétique (*Net-Zero Energy Buildings*) et de constructions sans émissions de gaz à effet de serre (*Zero Emission Buildings*), peut contribuer à réduire les émis-

## Fonctions écosystémiques dans la ville et leur contribution à la réduction des émissions

Les surfaces vertes et les éléments aquatiques dans les zones urbaines remplissent de nombreuses fonctions sur le plan écosystémique: ils procurent des habitats aux animaux et aux plantes, servent à la détente, permettent à l'eau de pluie de pénétrer dans le sol, améliorent la qualité de l'air et le climat urbain. Les plans d'eau à proximité des villes ont un effet modérateur sur le climat: ils apportent de la fraîcheur en été et sont des réserves de chaleur en hiver. Les surfaces vertes diminuent l'effet d'ilot de chaleur urbain en offrant des zones ombragées, en dissipant de la chaleur par évaporation et en améliorant la circulation de l'air. Ceci réduit sensiblement la consommation d'énergie pour la climatisation, les réfrigérateurs et d'autres équipements. En outre, les plantes contribuent à réduire la consommation d'énergie par le fait qu'elles assimilent du carbone. Le rôle des surfaces vertes de grande étendue, telles que parcs et places de jeu, est important dans ce contexte, mais celui d'éléments isolés, tels que des cordons boisés et des toitures recouvertes de verdure, peut également être substantiel. Dans la planification stratégique, la prise en compte des surfaces aquatiques et des zones vertes, ainsi que de leurs fonctions sur le plan écosystémique, peut donc contribuer de manière notable à la réduction des émissions dans les régions urbaines. De surcroît, de telles surfaces peuvent concourir à l'approvisionnement alimentaire local, à la gestion de dangers naturels tels que les crues, et au repos des citadins. Les systèmes écosystémiques urbains apportent ainsi une contribution particulièrement précieuse face aux défis du changement climatique en matière de santé et de bien-être (cf. chap. 2.8 La biodiversité et les services écosystémiques, p. 100).

sions du secteur du bâtiment de 50 à 80 pour cent par rapport au niveau de référence de 1990: dans le cadre de stratégies globales d'assainissement de quartiers de villes, de tels bâtiments peuvent compenser les émissions d'édifices plus gourmands en énergie (Upadhyay et al. 2015). La collection des normes de la SIA (Société suisse des ingénieurs et architectes) joue un grand rôle pour l'assainissement du parc immobilier suisse: elle accorde une importance grandissante à l'efficacité énergétique des bâtiments et à la lutte contre les impacts du changement climatique. A long terme, elle peut aider à atteindre les objectifs nationaux en matière d'émissions de gaz à effet de serre. Cependant, d'autres mesures sont encore nécessaires, en plus des normes SIA:

- l'augmentation de l'efficacité énergétique (enveloppe du bâtiment, installations techniques),
- une meilleure intégration des énergies renouvelables dans les bâtiments et les villes (installations solaires thermiques, modules photovoltaïques),

- l'amélioration de l'efficience globale des bâtiments et des infrastructures (planification urbaine, réseau de chaleur et/ou de froid, mise en service d'installations techniques etc.),
- la protection contre le rayonnement solaire au moyen de dispositifs pare-soleil et
- le renoncement à des prestations de service inutiles (changement des comportements et des modes de vie).

En conclusion, il convient de relever que la contribution des villes à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et de la consommation d'énergie présente de grandes incertitudes. D'une part, il n'existe pas de méthodes généralisées de relevés locaux permettant de mesurer les différences de consommation et d'émission entre les villes. Ces disparités dépendent de la configuration de l'espace urbain (compact ou étendu), des infrastructures (réseau routier, voies piétonnes, piste cyclables, âge des bâtiments), de la structure économique (industrie ou services) et de la stratification démographique (âge de la population résidente, mélange des âges). D'autre part, il y a de grandes incertitudes en ce qui concerne le développement des villes, ce qui complique énormément les prévisions de l'influence des formes et infrastructures urbaines sur la consommation d'énergie et sur les émissions de gaz à effet de serre. Des *stratégies « no-regret »*, telles que le « climate-proofing », qui consiste à contrôler la portée de mesures prises dans un environnement changeant, sont indispensables pour assurer l'adaptation à long terme des villes au changement climatique.

## Bibliographie

- GEA (2012) *Global Energy Assessment – Toward a Sustainable Future*. Cambridge University Press, Cambridge, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)*. Chapter 12 « Human Settlements, Infrastructure and Spatial Planning ». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Metron (2014) *Dichte und Mobilitätsverhalten – Zusammenhang zwischen Siedlungsstruktur und Mobilitätsverhalten*. Ein neuer Blick auf den Mikrozensus. SVI-Veranstaltungsreihe, Saint-Gall, 22.5.2014.
- OFEV (2012) *Anpassung an den Klimawandel in Schweizer Städten*. Rapport, 16 août 2012, 68 pp.
- OFS (2014) *Evolution future de la population – Données, indicateurs – Scénarios suisses*. [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch)
- OFS (2015) *L'utilisation du sol en Suisse – exploitations et analyses*. [www.bfs.admin.ch](http://www.bfs.admin.ch)
- United Nations (2014) *World Organization Prospects*. United Nations.
- Upadhyay G, Mauree D, Kämpf JH, Scartezzini J-L (2015) *Evapotranspiration model to evaluate the cooling potential in urban areas – A case study in Switzerland*. 14th International Conference of the International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, December 6-9, 2015.
- UVS (2016) *Statistiques des villes suisses*. Berne.



## Partie 4 : Politique climatique

### Auteures et auteurs

#### **Andrea Burkhardt**

Cheffe du département Climat de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

#### **Prof. Dr em. Thomas Cottier**

Professeur (émérite) de droit commercial européen et international à l'Université de Berne

#### **Dr Kateryna Holzer**

Post-doctorante, World Trade Institute, Université de Berne

#### **Prof. Dr Karin Ingold**

Directrice de l'Institut des sciences politiques de l'Université de Berne  
Professeure en analyse politique et gouvernance environnementale, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique, Université de Berne et Département des sciences sociales de l'environnement (ESS) de l'Institut fédéral pour l'aménagement, l'épuration et la protection des eaux (Eawag), Dübendorf

#### **Dr Axel Michaelowa**

Responsable du groupe Politique climatique internationale, titulaire de la chaire d'économie politique des pays en développement et des pays émergents, Institut des sciences politiques de l'Université de Zurich  
Directeur de Perspectives GmbH, Zurich

#### **Prof. Dr Philippe Thalmann**

Professeur d'économie de l'environnement naturel et construit, Institut d'architecture et de la ville (IA) de l'EPF de Lausanne



## 4.1 Introduction

Cette quatrième partie réunit quatre chapitres qui examinent la politique climatique de la Suisse, d'abord du point de vue de l'Administration fédérale, puis du point de vue de la science. Ils permettent de comprendre comment la Suisse a fixé ses objectifs de réduction et quelles mesures elle a prises pour les atteindre. Le contexte international est essentiel. La Suisse joue un rôle significatif sur la scène internationale et a obtenu des résultats respectables sans être exceptionnels.

*Philippe Thalmann (EPF de Lausanne)*

Cette partie débute par une présentation, par Andrea Burkhardt, cheffe de la Division climat à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), de la politique climatique suisse. Elle montre ce qui a été atteint et ce qui est encore visé. Les derniers chiffres des émissions de gaz à effet de serre, ceux de 2014, sont encourageants, puisque ces émissions sont inférieures de 9,3 pour cent par rapport à la référence de 1990. En même temps, l'année 2014 a été la plus chaude jamais mesurée en Suisse, ce qui a grandement aidé à faire baisser les émissions. Avec la météo de 1990, les émissions n'auraient été inférieures que de 5,2 pour cent à celles de 1990. A ce rythme, il faudra que 2020 soit une année encore beaucoup plus chaude pour que l'objectif fixé dans la loi sur le CO<sub>2</sub> d'une baisse des émissions de 20 pour cent puisse être atteint.

Même si la Suisse n'est pas encore sur son sentier de réduction des émissions visées, ce qui a été atteint est quand même remarquable au vu de la croissance économique et démographique. Les différentes contributions de la troisième partie Atténuation des émissions ont montré dans quels secteurs les efforts ont obtenu les meilleurs résultats et quels défis restent à surmonter. Cette quatrième partie s'attache maintenant aux objectifs de la politique climatique suisse et aux instruments mis en œuvre pour les atteindre. La contribution d'Andrea Burkhardt rappelle les objectifs déjà approuvés jusqu'en 2020 et ceux qui sont prévus au-delà. La comparaison avec le rapport de l'OcCC (2012) sur les objectifs climatiques montre que ces objectifs ne sont pas particulièrement ambitieux et probablement insuffisants pour un pays tel que la Suisse. Les objectifs pour 2030 annoncés pour la Conférence sur le climat de Paris impliquent néanmoins des efforts comparables pour la Suisse à ceux de l'Union européenne (Vöhringer et al. 2016).

Comme la Suisse ne parviendra vraisemblablement pas à atteindre ses objectifs de réduction par des mesures prises uniquement dans le pays, il convient d'examiner également des mesures prises à l'étranger. A noter que ce ne sont pas seulement des réductions d'émissions financées par des organisations nationales à l'étranger qui peuvent être portées en déduction des émissions suisses (mesures

de compensation). Ce qui est peut-être plus important pour le climat, ce sont les efforts de la diplomatie suisse pour faire avancer la cause du climat sur la scène internationale, pour promouvoir les mécanismes multilatéraux et pour encourager d'autres pays à mettre en place des politiques ambitieuses. Ces efforts sont présentés et évalués dans la contribution de Thomas Cottier et Kateryna Holzer, lesquels montrent aussi la diversité des formes que prend la coopération internationale et les difficultés qu'elle rencontre.

Les réductions obtenues à l'étranger sont-elles équivalentes aux réductions nationales? Evidemment, un million de tonnes de CO<sub>2</sub> évité en Suisse a le même effet pour le climat qu'un million de tonnes évité ailleurs. A l'étranger, ce dernier peut en principe être obtenu à un coût économique mais aussi énergétique et environnemental plus faible qu'en Suisse. On obtient donc plus pour le climat avec les mêmes ressources si l'on ne se limite pas aux réductions d'émissions réalisables en Suisse. D'un autre côté, il faudra bien que les émissions soient réellement réduites partout pour limiter le réchauffement à 2 degrés Celsius (voire à 1,5 degrés Celsius). Cela exige déjà aujourd'hui des investissements dans les techniques favorables au climat. Si les bâtiments et installations industrielles ne sont pas construits d'après les meilleurs standards ni remplacés ou rénovés graduellement, ils risquent bien d'assombrir encore longtemps le bilan climatique de la Suisse. De plus, les autres retombées favorables de la réduction des émissions pour les écosystèmes, la balance commerciale, la sécurité énergétique, l'innovation, l'emploi et la qualité de vie sont indéniablement des avantages complémentaires locaux, ce qui plaide en faveur des réductions à l'échelle nationale. En intégrant ces retombées, le coût net des mesures prises à l'intérieur du pays est finalement souvent très bas, même si le coût direct moyen d'une politique moyennement ambitieuse jusqu'en 2020 est estimé entre 150 et 321 francs par tonne de CO<sub>2</sub> selon le secteur (OFEV 2013).

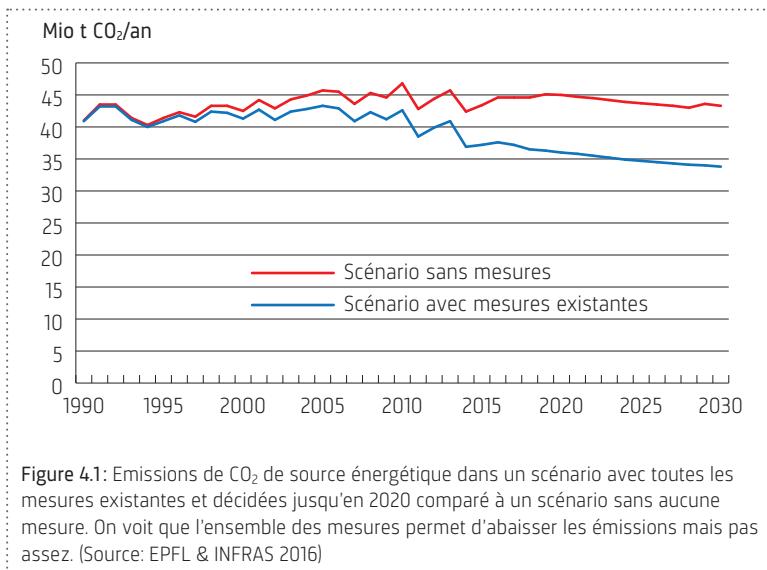


Figure 4.1: Emissions de CO<sub>2</sub> de source énergétique dans un scénario avec toutes les mesures existantes et décidées jusqu'en 2020 comparé à un scénario sans aucune mesure. On voit que l'ensemble des mesures permet d'abaisser les émissions mais pas assez. (Source: EPFL & INFRAS 2016)

Le coût de la réduction des émissions nationales et la distribution de ces coûts dans la société dépendent beaucoup des instruments mis en place pour les obtenir. Dans sa contribution, Karin Ingold montre que l'instrumentaire de la politique climatique suisse n'est pas le résultat d'une planification technocratique mais de compromis entre les acteurs en présence, élaborés au fil de deux décennies d'après marchandages. Une étude récente mandatée par l'OFEV (EPFL & INFRAS 2016) montre que ce sont des mesures prises dans plusieurs secteurs politiques qui ont contribué à stabiliser les émissions de CO<sub>2</sub> de la Suisse, principalement l'énergie et les transports (même si dans ce dernier domaine les objectifs de réduction ont été manqués). Sans toutes ces mesures, ces émissions auraient été 12 pour cent plus élevées qu'elles ne l'ont été effectivement en 2013.

De fait, il manque encore la vue d'ensemble qui permettrait de vérifier si l'ensemble des mesures prises avec un minimum de coûts a permis d'atteindre l'objectif visé. Probablement qu'une telle évaluation n'est même pas possible, parce que les effets sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre ne sont souvent que des rebondissements involontaires de mesures mises en place pour d'autres motifs. Néanmoins, Axel Michaelowa résume dans sa contribution l'expérience faite à travers le monde en matière de politique climatique à l'aide d'instruments internationaux et nationaux. Une comparaison avec l'instrumentaire suisse montre que la combinaison de mesures réglementaires, fiscales et de marché, de mesures contraintes et volontaires, telle qu'elle a émergé des marchandages nationaux, est peut-être plus efficace en termes de coûts qu'on pourrait le penser de prime abord.

## Bibliographie

- EPFL, INFRAS (2016) **Emissions scenarios without measures 1990-2030**. Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Zurich & Lausanne, 4 May.
- OcCC (ed.) (2012) **Objectifs climatiques et réduction des émissions**. Une analyse et vision pour la politique climatique de la Suisse. OcCC – L'Organe consultatif de la Confédération sur les changements climatiques, Berne, 35–51.
- OFEV (2013) **Coûts et potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre en Suisse**. Rapport du Conseil fédéral en réponse au postulat 11.3523 du 15 juin 2011 déposé par le Conseiller national Bastien Girod.
- Vöhringer F, Stocker D, Knoke W (2016) **Intended Nationally Determined Contributions (INDCs) under the Paris Agreement on Climate Change: Fact sheets for selected countries and assessments of underlying efforts**. Report to the Federal Office for the Environment (FOEN). Bern, Econability.

## 4.2 La politique climatique suisse

**La politique climatique de la Suisse a comme cadre les efforts déployés au niveau international pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. La Suisse a atteint l'objectif d'une réduction des émissions de 8 pour cent pour la première période d'engagement du Protocole de Kyoto (2008-2012) grâce, notamment, à l'imputation de certificats étrangers. Pour la deuxième période d'engagement, qui court jusqu'en 2020, les mesures de réduction des émissions sont concentrées exclusivement au niveau national. Une vaste gamme de mesures dans les secteurs des bâtiments, des transports et de l'industrie doit permettre d'atteindre l'objectif de réduction, fixé par la loi, de 20 pour cent d'ici 2020. Quant à l'après-2020, il fait l'objet de l'accord de Paris adopté par la communauté internationale. En amont de la conférence sur le climat de Paris, la Suisse a annoncé un objectif de réduction des émissions de 50 pour cent à l'horizon 2030 : cet objectif doit être atteint principalement par des mesures prises au niveau national, mais aussi par des réductions d'émissions à l'étranger.**

Andrea Burkhardt (OFEV)

### Conditions-cadres

Avec les Etats de la communauté internationale, la Suisse s'est engagée à stabiliser la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau permettant d'écartier le risque de perturbations dangereuses du climat dues à l'être humain. Ancré dans la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) de 1992, cet objectif requiert une réduction massive des émissions de gaz à effet de serre (OFEV 2014).

En 2014, les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse s'élevaient à 48,7 millions de tonnes d'équivalents-CO<sub>2</sub> (éq.-CO<sub>2</sub>), soit 9,3 pour cent de moins qu'en 1990, année de référence pour la politique climatique. Ce recul s'explique d'une part par la réduction des besoins en chauffage, due aux températures hivernales clémentes; très fluctuantes en fonction des degrés-jours de chauffage, les émissions de CO<sub>2</sub> des combustibles montrent que de nombreux bâtiments continuent toujours d'être chauffés aux énergies fossiles. On peut observer d'autre part un découplage entre l'évolution des émissions de gaz à effet de serre et la croissance : depuis 1990, les surfaces habitables et le parc automobile ont augmenté de plus d'un tiers, et la production industrielle de plus de la moitié.

Un niveau d'émissions supportable pour le climat suppose de réduire les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> à une tonne d'éq.-CO<sub>2</sub> par personne et par an d'ici à 2050. Avec 6,5 tonnes d'éq.-CO<sub>2</sub> par personne et par an, la Suisse est encore très éloignée de cet objectif. Certes, elle se situe sous la moyenne de l'OCDE, notamment grâce à sa production d'électricité à peu près exempte de CO<sub>2</sub> et à sa transformation structurelle en une société de services. Ce constat doit toutefois être relativisé si l'on tient compte des émissions de gaz à effet de serre dites « grises ». En effet, si l'on inclut dans le calcul les émissions indirectes générées à l'étranger par les biens et services importés en

Suisse, les émissions atteignent 11 à 13 tonnes d'éq.-CO<sub>2</sub> par habitant (Frischknecht et al. 2014). Et il faudra encore ajouter 6,5 tonnes si les actions étrangères détenues par la place financière suisse sont prises en considération (OFEV 2015).

### Objectifs de réduction de la première et de la deuxième période d'engagement

#### Première période, jusqu'en 2012

La Suisse poursuit une politique climatique concertée au niveau international et orientée sur le long terme, visant à réduire de manière continue les émissions de gaz à effet de serre. Elle s'est engagée au plan international pour les deux phases du Protocole de Kyoto, qui complète la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et fixe des objectifs de limitation des émissions pour les pays industrialisés. L'objectif de la première période d'engagement (2008-2012), visant à ramener les émissions de gaz à effet de serre à un niveau de huit pour cent inférieur à celui de 1990, a été atteint par la Suisse (OFEV 2014a). Dans un contexte où aucune mesure explicite de protection du climat n'a été formulée, les mesures de réduction nécessaires pour atteindre cet objectif ont été réalisées pour deux tiers au niveau national, et pour un tiers à l'étranger.

L'engagement de Kyoto a été mis en œuvre à l'échelon national par la loi sur le CO<sub>2</sub>. Durant la première période d'engagement, celle-ci était axée sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées aux combustibles et aux carburants et ne concernait donc qu'une partie des sources d'émissions et des gaz à effet de serre retenus à l'échelon international. Cet écart a été corrigé lors de la refonte de la loi pour la deuxième période d'engagement, à partir de 2012, et son champ d'application a été élargi à l'ensemble des sept gaz

visés par le Protocole de Kyoto<sup>1</sup> et aux effets de puits de carbone des forêts suisses et des produits du bois.

## Deuxième période, jusqu'en 2020

La loi sur le CO<sub>2</sub> en vigueur depuis le 1er janvier 2013 exige que les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse soient réduites d'ici 2020 de 20 pour cent par rapport à 1990. Cet objectif de réduction est conforme à l'engagement international pris par la Suisse avec la ratification de la deuxième période (2013-2020) du Protocole de Kyoto. Il existe toutefois deux différences en ce qui concerne l'objectif à atteindre : alors que l'objectif de réduction de la loi sur le CO<sub>2</sub> se réfère à l'année 2020, c'est toute la période de 2013 à 2020 qui est déterminante pour le Protocole de Kyoto. En valeur moyenne sur ces huit années, l'objectif final de 20 pour cent correspond à un effort de réduction moyen de 15,2 pour cent. A la différence de la loi sur le CO<sub>2</sub>, qui fixe un objectif purement national, des mesures réalisées à l'étranger peuvent également être imputées pour la réalisation de l'objectif international. Les mécanismes dits « de flexibilité » constituent une gamme d'instruments au sein du Protocole de Kyoto, grâce auxquels des certificats sont émis pour des réductions d'émissions dès que ces réductions sont atteintes à travers de projets concrets de protection du climat. La Suisse a fixé des exigences qualitatives élevées pour les certificats étrangers, de sorte que seuls sont admis des projets dans des pays moins développés, qui contribuent au développement durable et n'ont aucune conséquence écologique et sociale négative.

## Objectifs par secteurs

Afin de définir la combinaison d'instruments comprenant à la fois des mesures incitatives et de soutien, des règles obligatoires et des conventions d'objectifs volontaires, le Conseil fédéral a transposé l'objectif de 20 pour cent aux différents secteurs. Ainsi les émissions de gaz à effet de serre doivent-elles réduire à l'horizon 2020 de 40 pour cent dans les bâtiments, de 10 pour cent dans les transports et de 15 pour cent dans l'industrie. Des objectifs intermédiaires à l'échéance 2015 s'appliquaient également à ces trois secteurs, en fonction desquels, si nécessaire, les mesures de la deuxième moitié de la période d'engagement seraient adaptées. Alors que les secteurs des bâtiments et de l'industrie sont en voie d'atteindre leurs objectifs, celui des transports pourrait manquer largement le sien, dans la mesure où l'augmentation du nombre de kilomètres parcourus réduit à néant les progrès en matière d'efficience des véhicules.

<sup>1</sup> Dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), méthane (CH<sub>4</sub>), oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), hydrofluorocarbones (HFC), hydrocarbures perflourés (PFC), hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), trifluorure d'azote (NF<sub>3</sub>).

## Mesures de réduction à l'horizon 2020

### Taxe sur le CO<sub>2</sub>

La première loi sur le CO<sub>2</sub> accordait une importance élevée aux mesures volontaires adoptées par l'économie et les particuliers. Comme il est rapidement apparu que les efforts volontaires ne seraient pas suffisants à eux seuls, une taxe sur le CO<sub>2</sub> a été introduite en 2008 sur les combustibles (mazout, gaz naturel, charbon). La taxe sur le CO<sub>2</sub> est conçue comme une taxe incitative. Le renchérissement des combustibles fossiles vise à rendre plus attractives une utilisation plus efficace de l'énergie et une transition vers les énergies renouvelables. La plus grande partie des recettes de la taxe est redistribuée : aux entreprises, proportionnellement aux cotisations qu'elles versent à l'AVS, et à la population, à part égale par habitant ; sur le plan administratif, la redistribution est effectuée par le biais des assurances-maladie.

Le montant de la taxe était initialement de 12 francs par tonne de CO<sub>2</sub> (3 centimes par litre de mazout) ; il a depuis lors été revu trois fois à la hausse, les objectifs intermédiaires définis au préalable n'ayant pas été atteints pour les émissions de CO<sub>2</sub> des combustibles. Depuis 2016, la taxe s'élève à 84 francs par tonne de CO<sub>2</sub> (22 centimes par litre de mazout). Elle sera relevée automatiquement une nouvelle fois en 2018 si les émissions dues aux combustibles ne reculent pas assez.

### Programme Bâtiments et fonds de technologie

Afin de renforcer l'effet incitatif de la mesure, un tiers de la recette de la taxe sur le CO<sub>2</sub> – avec un maximum de 300 millions de francs – est affecté depuis 2010 au Programme Bâtiments. Celui-ci soutient l'assainissement de bâtiments, le recours aux énergies renouvelables, la récupération accrue de la chaleur et l'optimisation des installations techniques des bâtiments. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, le Parlement a approuvé un relèvement à un maximum de 450 millions de francs par an du montant alloué au Programme Bâtiments.

Depuis 2013, un fonds de technologie est alimenté par la taxe sur le CO<sub>2</sub>, à concurrence d'un maximum de 25 millions de francs par an, afin d'encourager l'innovation. Grâce au fonds de technologie, la Confédération cautionne des prêts accordés à des entreprises qui développent et commercialisent des produits et processus innovants visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre ou la consommation des ressources, à favoriser l'utilisation des énergies renouvelables et à accroître l'efficacité énergétique. Le fonds de technologie intervient dans une phase avancée de l'innovation : au moment de la mise sur le marché de tech-

niques éprouvées ou lors d'extensions de capacités, afin d'acquérir de nouveaux clients, et lorsqu'il y a un besoin en capitaux étrangers (à des conditions avantageuses).

## Echange de quotas d'émissions

Les entreprises dont la production génère d'importantes émissions de gaz à effet de serre et qui verrait leur compétitivité amoindrie par la taxe sur le CO<sub>2</sub> peuvent être exonérées de cette taxe si elles s'engagent en contrepartie à une réduire leurs émissions. Les grandes entreprises de certains secteurs sont exemptées de la taxe par la loi, qui les oblige au lieu de cela à participer au système d'échange de quotas d'émissions. Elles se voient attribuer un quota de droits d'émissions calculé selon des référentiels valables dans toute l'Europe et peuvent vendre ces droits si elles réduisent leurs émissions. Les émissions excédentaires doivent en revanche être couvertes par des droits d'émissions supplémentaires. Des certificats étrangers peuvent également être pris en compte, en quantité limitée.

Le système d'échange de quotas d'émissions, qui couvre aujourd'hui quelque dix pour cent des émissions de gaz à effet de serre de la Suisse, est conçu de manière compatible avec le système d'échange de quotas d'émissions de l'Union européenne (UE), beaucoup plus important, afin de pouvoir être couplé avec celui-ci. Les négociations au plan technique en vue d'un tel couplage ont abouti et un accord a été paraphé en ce sens. Le couplage des deux systèmes permettra aux entreprises d'accéder au marché de l'UE, beaucoup plus grand et plus liquide, et les écarts de prix entre les systèmes d'échanges de quotas d'émissions suisse et européen se réduiront.

## Accords sectoriels

Les usines d'incinération des ordures ménagères auraient pu être intégrées elles aussi dans le système d'échange de quotas d'émissions. En août 2013, dans le cadre d'un accord sectoriel, elles se sont engagées vis-à-vis de la Confédération à réduire leurs émissions; en contrepartie, elles ne sont plus soumises au système d'échange de quotas d'émissions. Un autre accord sectoriel a été adopté avec l'industrie de la haute tension et des semi-conducteurs afin de limiter les émissions d'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>).

Les émissions de gaz à effet de serre synthétiques<sup>2</sup> ont fortement augmenté depuis 1990 et elles représentent aujourd'hui environ trois pour cent de l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre de la Suisse. L'utilisation de ces

gaz est régie par l'ordonnance sur la réduction des risques liés aux produits chimiques (ORRChim, RS 814.81). Celle-ci prévoit une interdiction générale de ces substances, des exceptions étant toutefois accordées si les techniques de substitution ne sont pas encore disponibles ou sont encore plus néfastes pour l'environnement. En outre, dans le cadre du Protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone, la Suisse prend part aux négociations portant sur le démantèlement contraignant de la production et de l'emploi des hydrofluorocarbures halogénés (HFC), utilisés dans les équipements de refroidissement.

## Centime Climatique et obligation de compensation pour les carburants

Lors des discussions de la loi sur le CO<sub>2</sub> pour l'après-2012, le Parlement a supprimé la taxe sur le CO<sub>2</sub> sur les carburants. Le Conseil fédéral avait cependant misé dès 2005 sur le Centime Climatique, une initiative privée du secteur pétrolier qui finance des mesures en Suisse et à l'étranger. Lors de la refonte de la loi en 2013, le Centime Climatique a été transformé en une obligation de compensation pour les importateurs de carburants fossiles. Ces derniers doivent compenser un pourcentage déterminé des émissions de CO<sub>2</sub> générées par les transports par des mesures en Suisse. La part à compenser augmente progressivement depuis 2013 et atteindra 10 pour cent en 2020. La plupart des importateurs ont mandaté la Fondation pour la protection du climat et la compensation de CO<sub>2</sub> KliK en vue de mettre en œuvre cette obligation de compensation. Ils peuvent choisir librement dans quel secteur l'effort de réduction sera déployé. Ils peuvent lancer leurs propres projets ou acheter auprès de tiers des attestations établies par la Confédération pour les réductions d'émissions réalisées en Suisse, si ces réductions satisfont aux exigences minimales et s'ajoutent à des mesures de toute façon mises en œuvre.

Alors que l'obligation de compensation ne réduit pas nécessairement les émissions de CO<sub>2</sub> des transports, vu qu'une part importante des projets vise la réduction des gaz à effet de serre dans d'autres secteurs, les prescriptions en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> introduites en 2012 pour les voitures de tourisme neuves ont par contre, un effet sur la réduction des émissions. En 2015, les voitures de tourisme nouvellement immatriculées ne peuvent en effet pas émettre, en moyenne, plus de 130 grammes de CO<sub>2</sub> par kilomètre. Dans le cadre de la Stratégie énergétique 2050, le Parlement a adopté un renforcement de ces prescriptions à l'horizon 2020, avec un plafonnement à 95 grammes, ainsi que l'introduction de prescriptions pour les véhicules utilitaires et les tracteurs à sellette légers.

<sup>2</sup> Hydrofluorocarbones (HFC), hydrocarbures perfluorés (PFC), hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>) et trifluorure d'azote (NF<sub>3</sub>).

## L'accord de Paris sur le climat

La coopération internationale en matière de politique climatique est plus importante encore que pour les autres problèmes concernant l'environnement. Avec son écologie de montagne sensible, la Suisse est particulièrement touchée par les effets des changements climatiques. Compte tenu de sa faible contribution de 0,1 pour cent aux émissions mondiales de gaz à effet de serre, il est cependant évident que la Suisse ne peut contenir les changements climatiques qu'en tant que membre de la communauté internationale. La bonne réputation de la Suisse sur la scène internationale lui permet d'influencer les décisions favorisant une politique efficace et de jouer les bons offices entre des intérêts divergents. La Suisse est aussi un partenaire crédible parce qu'elle donne le bon exemple et est consciente de ses responsabilités. En tant que nation industrialisée de petite taille dont la force d'innovation fait son succès, notre pays est prédestiné à démontrer que la prospérité et la protection du climat sont compatibles. En effet, de nombreux pays émergents et en développement ont longtemps considéré la politique climatique comme un frein à la croissance. Cette approche a fait place au constat que la politique climatique offrait également de nombreuses chances à l'économie et que les coûts d'un changement climatique débridé étaient infiniment plus élevés que les coûts pour l'enrayer; c'est ce constat qui a ouvert la voie à l'accord de Paris.

## La distinction entre pays industrialisés et pays en développement définitivement abandonnée

Lors de la conférence sur le climat de Paris, fin 2015, un accord a été conclu pour la période après 2020, qui engage tous les Etats à adopter des mesures de réduction des émissions. La distinction qui prévalait jusqu'alors entre pays industrialisés et pays en développement a ainsi été définitivement abandonnée. L'objectif est de contenir le réchauffement mondial moyen bien en dessous de 2 degrés Celsius par rapport à l'ère préindustrielle, les efforts étant concentrés sur une hausse maximale de la température de 1,5 degrés Celsius. L'accord oblige tous les Etats à atteindre tous les cinq ans un objectif de réduction des émissions fixé au niveau national et à en rendre compte au niveau international. La réalisation de l'objectif reste uniquement contraignante sur le plan politique. La mise en œuvre de mesures nationales ainsi que les rapports sur la réalisation de l'objectif et leur contrôle au niveau international sont néanmoins juridiquement contraignants.

Les réductions d'émissions réalisées à l'étranger pourront être imputées à la réalisation de l'objectif, pour autant qu'elles respectent l'intégrité de l'environnement, qu'elles contribuent au développement durable et qu'elles ne donnent pas lieu à un double comptage. Cela s'applique aussi bien aux mé-

canismes de marché dans le cadre de la Convention sur les changements climatiques qu'aux approches hors Convention.

Afin de faire face aux effets des changements climatiques, tous les Etats doivent élaborer des plans d'adaptation et faire rapport sur les mesures prises. En matière de financement également, le clivage du régime climatique international entre pays industrialisés et pays en développement a été cassé de manière significative. La mobilisation de moyens de financement provenant de sources publiques et privées est désormais l'affaire de tous. Les pays industrialisés doivent néanmoins continuer à montrer l'exemple. L'objectif commun des pays industrialisés de mobiliser 100 milliards de dollars par an à partir de 2020 a été confirmé à Paris. L'accord de Paris a également pour objectif d'orienter les flux financiers dans un sens respectueux du climat.

## Perspectives pour la période après 2020

Dans la cadre de la préparation à l'accord de Paris, le Conseil fédéral a adopté en novembre 2014 des objectifs de réduction des émissions pour la période après 2020. Pour 2030, les émissions de gaz à effet de serre de la Suisse doivent être réduites au total de 50 pour cent sous le niveau de 1990: de 30 pour cent par des mesures en Suisse et de 20 pour cent par des mesures à l'étranger. Le Conseil fédéral a fait une proposition dans le sens d'une réduction de l'ordre de 70 à 85 pour cent à l'horizon 2050. Cela signifie que le secteur des bâtiments et des transports ne produiront presque plus de CO<sub>2</sub>.

Pour la prochaine étape de la politique climatique jusqu'en 2030, la loi sur le CO<sub>2</sub> doit à nouveau être amendée afin de donner une assise juridique aux objectifs et mesures adoptés. Dans le cadre du système incitatif en matière climatique et énergétique (SICE), par lequel le Conseil fédéral entend engager la deuxième étape de la Stratégie énergétique 2050, l'affectation partielle de la recette de la taxe sur le CO<sub>2</sub> au Programme Bâtiments et au fonds de technologie doit être supprimée. Au lieu de subventions, des prescriptions en matière de CO<sub>2</sub> devraient être plus efficaces dans le secteur des bâtiments.

## Bibliographie

Frischknecht R et al. (2014) *Evolution de l'impact environnemental de la Suisse dans le monde (Synthèse)*. OFEV, Berne. Connaissance de l'environnement 1413: 14 pp.

OFEV (2014a) *Emissions des gaz à effet de serre d'après la loi sur le CO<sub>2</sub> et d'après le Protocole de Kyoto*. www.bafu.admin.ch

OFEV (2014b) *La politique climatique suisse en bref*. Bilan et perspectives sur la base du rapport 2014 de la Suisse à l'attention du Secrétariat de l'ONU sur les changements climatiques. Berne, 24 pp.

OFEV (2015) *La place financière suisse exposée aux risques induits par le carbone*. www.bafu.admin.ch

## 4.3 Naissance et développement d'une politique climatique

**Des politologues suisses ont analysé le processus politique de décision qui a abouti à la loi sur le CO<sub>2</sub>. Les résultats donnent une idée de l'évolution des constellations d'acteurs qui ont participé de 1995 à 2012 à la politique suisse de réduction des émissions. Au cours du processus, deux coalitions se sont formées: l'une pro-économie, composée de représentants de l'économie et des partis de centre droit, et l'autre pro-environnement, comprenant des membres de partis de gauche, d'organismes de défense des consommateurs, de syndicats et d'associations de protection de l'environnement. Le fait qu'une solution de compromis ait été trouvée en dépit de durcissements momentanés des positions est avant tout le mérite de personnalités de l'élite politique qui n'appartenaient ni à l'une, ni à l'autre de ces coalitions idéologiques et qui se sont fortement engagées pour le compromis. Tout ceci montre que la politique suisse en matière de protection du climat n'a pas été un processus planifié. La définition des objectifs et l'introduction des instruments de cette politique ont toujours été le résultat de négociations entre acteurs et groupements ayant des idéologies et préférences différentes.**

Karin Ingold (*Université de Berne et Eawag*)

Trois études successives (cf. Rohrer 2012; Sutter 2012; Ingold 2008 & 2011) ont analysé le processus politique de décision de la loi sur le CO<sub>2</sub> (RS 641.71) et l'ont évalué au cours du temps. Concrètement, elle reposent sur trois enquêtes<sup>1</sup> menées auprès d'acteurs de l'élite politique au sujet de leur collaboration et coordination dans le contexte de l'introduction, de la révision et de la prolongation de la loi sur le CO<sub>2</sub>. L'élaboration de ce texte a fait l'objet d'une première période de négociations, de 1995 à 2000; une seconde phase, de 2002 à 2005, a tourné autour de la taxe sur le CO<sub>2</sub> et du centime climatique; et la dernière étape, de 2010 à 2012, a porté sur la reconduction et l'application de la loi. Ces analyses offrent ainsi un aperçu systématique de l'évolution des constellations d'acteurs qui ont participé à la politique suisse de réduction des émissions de 1995 à 2012.

L'élite politique a été caractérisée au moyen de la combinaison de trois approches bien établies en science politique (Knoke et al. 1996). Les trois approches partent de l'hypothèse selon laquelle seuls des acteurs collectifs – donc des organisations et non pas des individus – disposent des ressources suffisantes pour influencer de façon déterminante l'élaboration ou la révision d'une loi (Knoke 1993). C'est pourquoi l'élite suisse en matière de politique climatique est constituée d'acteurs collectifs tels que des associations économiques, partis, offices fédéraux et secrétariats de départements, commissions parlementaires, instituts scientifiques ou syndicats. Pour que les trois

études puissent être comparées, elles considèrent chacune les mêmes 34 acteurs (cf. tab. 4.1).<sup>2</sup>

### Développement de la collaboration

Les représentants des 34 organisations ont reçu une liste telle que celle représentée au tableau 4.2. Ils ont été priés de nous indiquer avec quelles organisations de cette liste ils collaboraient étroitement en matière d'élaboration, de révision ou de prolongation de la loi sur le CO<sub>2</sub>.

Comme le montre le tableau 4.1, cette collaboration augmente depuis l'introduction de la législation sur le CO<sub>2</sub> (période t1, 1995-2000) jusqu'à la première révision en 2005 (période t2, 2002-2005), puis diminue par la suite (période t3, 2010-2012). La densité indique la part représentée par les liens de collaboration observés parmi tous ceux possibles dans ce réseau de 34 acteurs. Il est intéressant de voir que beaucoup de contacts qui se sont établis entre l'introduction et la première révision ont été rompus entre la deuxième et la troisième phase (2002-2005 et 2010-2012). Cette évolution permet de faire deux suppositions. Premièrement, la première révision de la loi sur le CO<sub>2</sub> durant la période t2 aux alentours 2005 a éveillé l'attention de nombreux acteurs de l'élite politique. Il est typique dans un processus politique que la collaboration et les interactions augmentent lorsque diverses organisations souhaitent voir la politique refléter leurs intérêts et leurs idéologies. Plus une organisation voit son système de valeurs menacé par une nouvelle loi ou une révision, ou moins un acteur dispose de sa propre compétence dé-

<sup>1</sup> Pour collecter les points de vue des acteurs au sujet des questions de politique climatique (données dites de convictions, en anglais « belief data »), Sutter (2012) s'est basé exclusivement, et Ingold (2008) partiellement sur des données codées de la procédure de consultation nationale.

<sup>2</sup> De nouveaux acteurs sont apparus après 2010, par exemple le Parti vert libéral, mais sont ignorés dans cet article, pour permettre de comparer le même nombre d'acteurs. Certains ont également changé de nom entretemps, comme la Société suisse de l'industrie chimique (SSIC), appelée aujourd'hui scienceindustries. Nous avons gardé ici le nom en vigueur au moment de la réalisation d'au moins deux des trois études.

| Associations économiques  |  |
|---------------------------|--|
| 1.                        | economiesuisse   |
| 2.                        | SSIC Société suisse de l'industrie chimique  |
| 3.                        | Swissmem   |
| 4.                        | Cemsuisse  |
| 5.                        | AFP Association suisse des propriétaires fonciers  |
| 6.                        | OEBU Association suisse pour l'intégration de l'éologie dans la gestion d'entreprises                                      |
| Branche des transports    |  |
| 7.                        | TCS Touring Club Suisse  |
| 8.                        | ATE Association transports et environnement  |
| 9.                        | FRS Fédération routière suisse   |
| Organisations faîtières   |  |
| 10.                       | USS Union syndicale suisse   |
| 11.                       | Travail Suisse Organisation faîtière des travailleurs et travailleuses   |
| Branche de l'énergie      |  |
| 12.                       | AEnEC Agence de l'énergie pour l'économie  |
| 13.                       | AEE Agence pour l'énergie renouvelable et l'efficacité énergétique   |
| 14.                       | UP Union pétrolière  |
| 15.                       | Forum Suisse de l'énergie  |
| Partis                    |  |
| 16.                       | PDC Parti démocrate-chrétien   |
| 17.                       | PLR Les Libéraux-Radicaux  |
| 18.                       | PSS Parti socialiste suisse  |
| 19.                       | UDC Union démocratique du centre   |
| 20.                       | PES Parti écologiste suisse  |
| Sciences                  |  |
| 21.                       | INFRAS   |
| 22.                       | Prognos  |
| 23.                       | Faktor AG  |
| 24.                       | ProClim - Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles                     |
| 25.                       | OcCC - Organe consultatif sur les changements climatiques  |
| 26.                       | PRN Climat   |
| Organisations écologiques |  |
| 27.                       | Greenpeace   |
| 28.                       | WWF  |
| 29.                       | Equiterre  |
| Administration            |  |
| 30.                       | OFEV Office fédéral de l'environnement (anciennement OFEFP<br>Office fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage) |
| 31.                       | OFEN Office fédéral de l'énergie   |
| 32.                       | SECO Secrétariat d'Etat à l'économie   |
| 33.                       | DETEC Département fédéral de l'environnement, des transports,<br>de l'énergie et de la communication                       |
| 34.                       | AFF Administration fédérale des finances   |

Tableau 4.1: L'élite de la politique climatique suisse. (Source: adapté d'après Ingold 2008; 2011; 2014)

cisionnelle (voting power), plus cette organisation ou cet acteur est tributaire de la collaboration avec d'autres (Ingold et al. 2016; Stokman & Zeggelink 1996). La seconde supposition est que la diminution de la collaboration pendant la troisième période (2010-2012) tient à une baisse générale de l'activité dans les réseaux de l'élite politique, son intensité baissant au fur et à mesure que l'on approche de son aboutissement (Toreenvirled & Thomson 2003); en effet, des acteurs tels que des groupes d'intérêts ou des associations économiques sont moins impliqués à ce stade de la mise en œuvre (Ingold & Fischer 2014).

## Coalitions idéologiques

Lehmann et Rieder (1999), puis plus récemment les auteurs cités ci-après (Rohrer 2012; Sutter 2012; Ingold 2008) ont classé les acteurs de l'élite politique en deux coalitions déterminantes de la politique climatique suisse: l'une pro-économie, composée de représentants de l'économie et des partis de centre droit, et l'autre pro-environnement, comprenant des membres de partis de gauche, d'organismes de défense des consommateurs, de syndicats et d'associations de protection de l'environnement. Ceci montre qu'en Suisse, la protection du climat n'a été à aucun moment un processus planifié, mais qu'en ce domaine la définition des objectifs et l'introduction d'instruments politiques ont toujours été le résultat de négociations entre acteurs et groupements ayant des idéologies et préférences différentes. A cet égard, la politique climatique suisse ne fait nullement exception, comme le montrent de différentes études au sujet de divers processus politiques.<sup>3</sup>

Même si ces deux coalitions idéologiquement opposées semblent stables au cours du temps, quelques détails valent la peine d'être mentionnés. Premièrement, les analyses ont montré que le conflit entre ces deux groupements a atteint son apogée pendant la deuxième période (2002-2005). L'enquête auprès de l'élite politique (Ingold 2011) et la codification des réponses au processus de consultation (Ingold 2008) révèlent que les fronts se sont durcis lors de la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>, entre 2002 et 2005. La coalition pro-environnement voulait absolument que la taxe sur le CO<sub>2</sub> soit réalisée comme inscrit dans la loi – et ceci tant pour les combustibles que pour les carburants –, alors que les membres du rassemblement pro-économie, en premier lieu les importateurs de pétrole et le secteur des transports, entendaient éviter cette taxe et ont défendu la solution du centime climatique. Finalement, le Conseil fédéral a opté pour une combinaison entre une

<sup>3</sup> Voir Sciarini et Fischer (2013; 2015), qui comparcent les 11 plus importants domaines et questions politiques des Suisses au XXI<sup>e</sup> siècle; cf. Kriesi et legen (2001), qui ont une manière semblable à la nôtre d'analyser 30 ans de politique énergétique suisse.

| Densité du réseau de collaboration |                |                |                |
|------------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Période d'observation              | t1 (1995-2000) | t2 (2002-2005) | t3 (2010-2012) |
| Densité                            | 0,08           | 0,18           | 0,10           |

| Changements au cours du temps |       |       |       |       |       |
|-------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Intervalle                    | Total | 0 → 0 | 0 → 1 | 1 → 0 | 1 → 1 |
| t1-t2                         | 1156  | 931   | 133   | 18    | 74    |
|                               | 100%  | 81%   | 12%   | 2%    | 6%    |
| t2-t3                         | 961   | 738   | 30    | 131   | 62    |
|                               | 100%  | 77%   | 3%    | 14%   | 6%    |

0 = aucun lien, 1 = un lien de collaboration

Tableau 4.2: Evolution de la collaboration au cours du temps. (Source: tableau élaboré par l'auteure)

taxe sur le CO<sub>2</sub> prélevée sur les combustibles et un centime climatique prélevé sur les carburants. Ce compromis a été obtenu surtout grâce à d'importants représentants de l'élite politique qui n'appartenaient ni à l'une, ni à l'autre de ces coalitions idéologiques et qui se sont fortement engagés pour cet arrangement (cf. Ingold & Varone 2012 et la discussion du rôle de l'Office fédéral de l'énergie [OFEN] ainsi que du Parti démocrate-chrétien [PDC]).

A noter cependant que même pendant cette deuxième période (2002-2005), les coalitions ont également collaboré entre elles. La collaboration était certes moins intense que celle entre acteurs d'une même coalition, mais les liens de coopération avec des membres de l'autre groupe étaient néanmoins importants. Ceci semble être un phénomène typique de la politique suisse d'atténuation du changement climatique. Déjà pendant la première période (1995-2000), l'Office fédéral de l'environnement (OFEV, à l'époque OFEFP) a collaboré étroitement avec les représentants de l'économie de même qu'avec ceux de la communauté scientifique à l'élaboration de la loi (Ingold 2008). Et pour la mise en œuvre de la loi sur le CO<sub>2</sub>, l'Agence de l'énergie pour l'économie (AEnEC) est représentante de grandes parties de l'économie en même temps que partenaire de l'administration fédérale.

## Acteurs majeurs

Au moyen de mesures de centralité dans le réseau de collaboration, on peut déterminer quelles organisations étaient particulièrement actives ou se trouvaient dans des positions stratégiques importantes.<sup>4</sup> Le WWF a été tout

le temps l'acteur le plus central au sein de la coalition pro-environnement: il était l'un des chefs de file de l'Alliance climatique suisse, mais a aussi cherché à coopérer avec des acteurs extérieurs.

Au sein de la coalition pro-économie, ce sont avant tout economiesuisse, en tant qu'organisation faîtière de l'économie suisse, et l'AEnEC qui se sont constamment impliquées et ont joué un rôle central. Pendant la deuxième période, lors des négociations au sujet de l'introduction d'une taxe sur le CO<sub>2</sub>, l'Union pétrolière a également été très active et a joué un rôle impor-

tant dans ce processus: d'abord seule, puis avec le TCS et economiesuisse, elle a proposé le centime climatique comme alternative à la taxe sur le CO<sub>2</sub> (avant tout pour les carburants). Ce faisant, elle ne s'est pas limitée à une simple prise de position en faveur de cette solution, mais a déployé une grande activité avec d'autres acteurs partageant le même point de vue, de même qu'envers des représentants de l'administration fédérale et de la coalition pro-environnement.

Finalement, et comme mentionné plus haut, le Conseil fédéral a opté en 2005 pour un compromis, influencé notamment par des acteurs centraux tels que le PDC, l'OFEN et des représentants de la communauté scientifique (avant tout du PRN « Climat », de ProClim et de l'OCC) qui se sont positionnés stratégiquement entre les membres des deux coalitions.

Pendant la troisième et dernière phase, de 2010 à 2012, de nombreux acteurs actifs et centraux des deux premières périodes se sont un peu retirés. Le mémoire de master de Rohrer (2012) constate qu'avant tout des représentants d'organes de la Confédération, tels que le DETEC, l'OFEV et l'OFEN, étaient encore actifs. Le rôle de l'OFEV est significatif non seulement dans le contexte suisse, mais aussi au niveau international: en plus d'assurer l'exécution de la loi sur le CO<sub>2</sub>, cet office fédéral veille à la cohérence entre les accords et décisions internationaux et leur transposition et mise en œuvre sur le plan national (cf. à ce sujet Ingold & Pflieger [2016]).

<sup>4</sup> Nous nous référions ici avant tout à la centralité d'intermédiairité (Freeman 1979), qui indique combien de fois un acteur se trouve entre deux autres non reliés entre eux. Les acteurs caractérisés par une centralité d'intermédiairité élevée maintiennent la cohérence du réseau et exercent un contrôle sur des liens.

## Bibliographie

- Fischer M, Sciarini P (2013) **Europeanization and the inclusive strategies of executive actors.** Journal of European Public Policy 20: 1482–1498.
- Ingold K (2008) **Les mécanismes de décision – Le cas de la politique climatique Suisse.** Politikanalysen, Rüegger Verlag, Zurich.
- Ingold K (2011) **Network Structures within Policy Processes: Coalitions, Power, and Brokerage in Swiss Climate Policy.** Policy Studies Journal 39: 435–459.
- Ingold K, Varone F (2012) **Treating Policy Brokers Seriously: Evidence from the Climate Policy.** Journal of Public Administration Research and Theory 22: 319–346.
- Ingold K, Fischer M (2014) **Drivers of collaboration to mitigate climate change: An illustration of Swiss climate policy over 15 years.** Global Environmental Change 24: 88–98.
- Ingold K, Pflieger G (2016) **Two levels, two strategies: explaining the gap between Swiss national and international responses towards Climate Change.** Environmental Policy Analysis Journal 2: 20–38.
- Ingold K, Fischer M, Cairney P (2016) **Drivers for policy agreement in nascent subsystems: An Application of the Advocacy Coalition Framework to Fracking policy in Switzerland and the UK.** Submitted to Policy Studies Journal.
- Knoke D (1993) **Networks of elite structure and decision making.** Sociological Methods & Research 22: 22–45.
- Knoke D, Pappi FU, Broadbent J, Tsujinaka Y (1996) **Comparing policy networks: Labor politics in the US, Germany, and Japan.** Cambridge University Press, Cambridge.
- Kriesi H-P, Jegen M (2001) **The Swiss energy policy elite: The actor constellation of a policy domain in transition.** European Journal of Political Research 39: 251–287.
- Lehmann L, Rieder S (2002) **Wissenschaftliches Wissen in politischer Auseinandersetzung: Fallstudie zur Genese des CO<sub>2</sub>-Gesetzes im Auftrag der Arbeitsgruppe Transdisziplinarität der Energiekommission der Schweizerischen Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW).** Rapport SATW 34. SATW, Zurich.
- Rohrer D (2012) **Die Rolle des Policy Netzwerks in der Schweizer Klimapolitik.** Mémoire de master . IDHEAP Lausanne, Université de Lausanne, Université de Berne.
- Sciarini P, Fischer M, Traber D (2015) **Political Decision-Making in Switzerland.** The Consensus Model under Pressure. Palgrave.
- Stokman FN, Zeggelink E (1996) **Is politics power or policy oriented? A comparative analysis of dynamic access models in policy networks.** Journal of Mathematical Sociology 21: 77–111.
- Sutter A (2012) **Schweizer Klimapolitik nach 2012.** Mémoire de master. EPF de Zurich.
- Toreenvlied R, Thomson R (2003) **Is implementation distinct from political bargaining?** Rationality and Society 15: 64–84.

## 4.4 Politiques climatiques dans le monde: Enseignements tirés de leur mise en œuvre

**La protection du climat exige impérativement une collaboration internationale. Jusqu'ici, le bilan de cette coopération est contrasté. D'une part, les politiques internationales et nationales de protection du climat n'ont pas réussi, pendant les 20 dernières années, à freiner de façon significative l'augmentation mondiale des émissions de gaz à effet de serre. D'autre part, des taxes sur les émissions et des réglementations, accompagnées de progrès techniques, ont conduit à un recul substantiel des émissions dans une série de pays, avant tout en Scandinavie, sans affaiblir leur compétitivité économique. La coopération en dehors de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques a montré jusqu'à maintenant peu d'effets au niveau mondial, alors que les mécanismes de marché du Protocole de Kyoto ont suscité dans le monde entier des milliers de projets de réduction des émissions.**

Axel Michaelowa (*Université de Zurich*)

L'atténuation du changement climatique est une contribution à un bien public mondial. Le lieu où une réduction des émissions de gaz à effet de serre est réalisée est égal pour le climat. Ceci permet, d'une part, de choisir les possibilités les plus économiques au niveau mondial de réduire les émissions mais peut, d'autre part, inciter au parasitisme, c'est-à-dire à profiter des investissements des autres. Dans le pire des cas, personne ne fait rien. C'est pourquoi la coopération internationale est une condition absolument nécessaire à une protection efficace du climat. Une structure pour cette coopération existe depuis 20 ans: la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Dans de nombreux pays, elle a joué un rôle de catalyseur pour l'introduction d'instruments nationaux de politique climatique. Ceci permet de juger des circonstances dans lesquelles des instruments internationaux et nationaux de réduction des émissions de gaz à effet de serre peuvent être utilisés avec succès.

### La Convention sur le climat et le Protocole de Kyoto – un succès malgré quelques faiblesses

Dans le débat public, on a souvent l'impression que la politique de protection du climat a échoué. Ceci va de pair avec des appels à interrompre le processus de négociation des Nations Unies sur le climat et à laisser à des «clubs» d'Etats influents le soin de façonnner la politique climatique internationale. Ces appels, dérivés de considérations propres à la théorie des jeux<sup>1</sup>, sont pratiquement dénués de toute base empirique. En dépit de la phase difficile des négociations depuis l'échec, en 2009, de la conférence de Copenhague, le régime climatique des Nations Unies jouit d'une grande reconnaissance. En témoigne le fait qu'en 2015 à Paris, la Conférence des Parties est par-

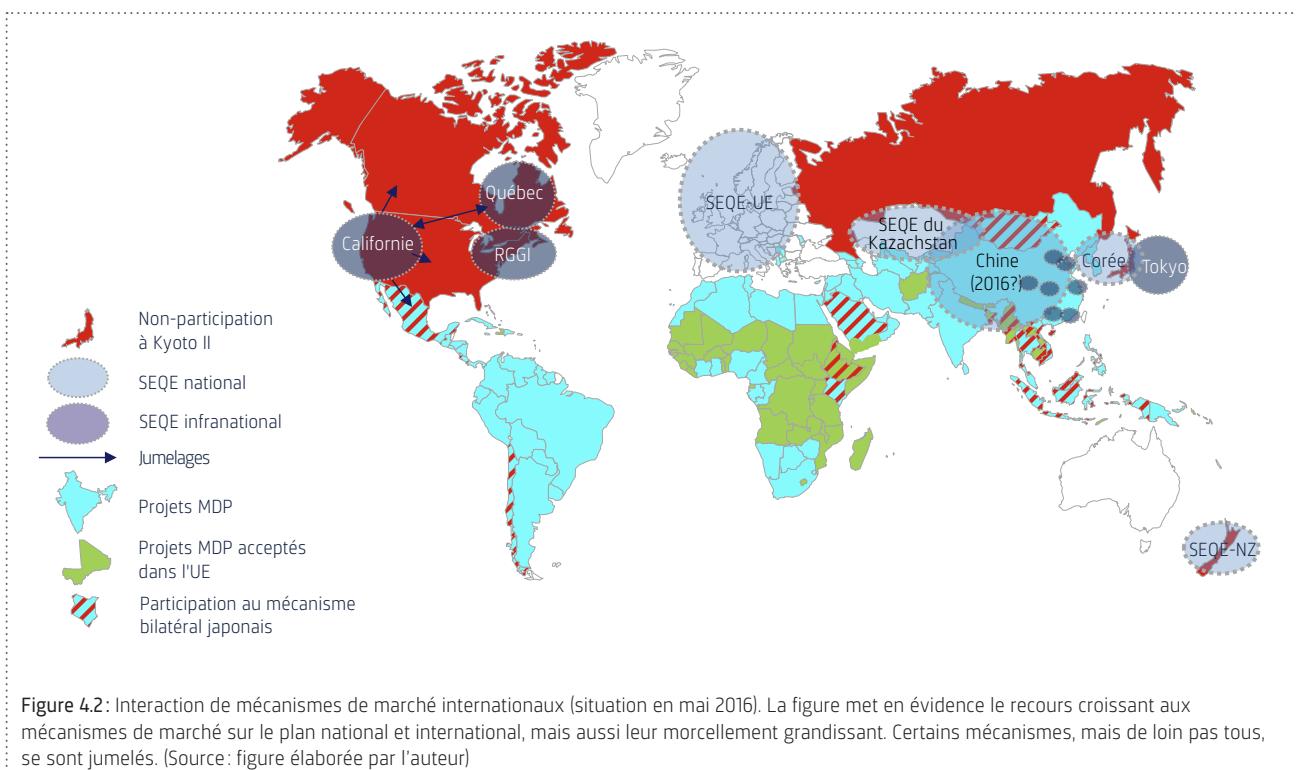
venue à associer tous les Etats à un accord contraignant en matière de réduction des émissions. Les tentatives de coopération internationale extérieures à ce régime n'ont pas eu, jusqu'ici, d'effet significatif pour la protection du climat. La seule exception est le Protocole de Montréal relatif à des substances qui appauvrisent la couche d'ozone: il a conduit – comme effet secondaire – à une forte réduction de gaz exerçant un très puissant effet de serre.

Les objectifs d'émissions du Protocole de Kyoto adopté en 1997 et entré en vigueur en 2005 ont été plus que remplis pendant la période d'engagement 2008-2012. Les pays industrialisés – seuls à avoir eu un objectif d'émissions contraignant – ont profité toutefois de la réduction des rejets quasiment gratuite qui a fait suite à l'effondrement de l'industrie lourde des pays en transition d'Europe de l'Est et de l'ex-Union soviétique; cette réduction n'avait pas été suffisamment prise en compte lors de la définition, à Kyoto, des objectifs d'émissions de ces pays. Etant donné que le Protocole de Kyoto ne couvre qu'une petite partie des émissions mondiales pendant la période d'engagement 2013-2020, son effet sera nettement moins grand.

### Des milliards en quotas d'émission – les mécanismes de marché du Protocole de Kyoto

Les éléments les plus innovants du Protocole de Kyoto sont ses mécanismes internationaux de marché. Ils permettent aux pays industrialisés ayant un objectif contraignant d'acheter des certificats de réduction des émissions à l'étranger. Le mécanisme de développement propre (MDP) a suscité depuis 2005 plus de 7500 projets de réduction des émissions dans plus de 90 pays en développement, ce qui est bien au-delà des attentes initiales. Ces projets ont produit plus de 1,7 milliards de certificats d'émission. En même temps, ils ont donné naissance à une branche spécialisée réunissant des sociétés-conseils, des développeurs de

<sup>1</sup> Dans la théorie des jeux, des acteurs poursuivent leur propre intérêt et agissent selon une stratégie qui les avantage au maximum.



projets et des prestataires de services financiers. Toutefois, lors de la mise en œuvre du MDP, des problèmes se sont posés pour déterminer l'évolution des émissions dans le cas d'une « poursuite de la politique énergétique actuelle », référence indispensable pour calculer la réduction des émissions. Au début, des projets ont profité d'effets d'aubaine : ils ont été acceptés, alors qu'ils auraient été aussi réalisés sans les recettes provenant de la vente des certificats. Les régulateurs du MDP ont réagi à ces défis et sont parvenus à améliorer l'intégrité environnementale de ce mécanisme. La demande de certificats a diminué après 2012 – d'une part parce que les pays industrialisés se sont fixé des objectifs d'émissions moins ambitieux, d'autre part du fait que de nombreux pays industrialisés ont introduit des limites à l'importation de certificats. Officiellement, ces obstacles au marché des émissions ont été justifiés par des doutes au sujet de l'intégrité environnementale des certificats MDP, mais ils étaient aussi dans l'intérêt des fournisseurs de techniques de réduction des émissions. En conséquence, les prix des certificats sont tombés de plus de 15 francs par tonne de CO<sub>2</sub> à quelques centimes, ce qui a entraîné l'hémorragie de la branche et l'interruption abrupte du développement des projets.

A cause de problèmes institutionnels et de l'excédent de certificats dans les pays en transition, les deux autres mécanismes, à savoir la mise en œuvre conjointe (MOC) et

l'échange international de quotas d'émission (IET), sont restés loin derrière le MDP.

### Politiques climatiques nationales – couverture en augmentation, mais les effets tardent à se manifester

Dans le contexte du développement de la politique climatique internationale, principalement du Protocole de Kyoto, des gouvernements s'occupent de plus en plus de l'élaboration de politiques nationales de protection du climat. Il s'ensuit que les politiques de réduction des émissions se développent dans le monde entier. Alors qu'en 2007, seulement 45 pour cent des émissions mondiales de gaz à effet de serre étaient couvertes par des politiques de protection du climat, 67 pour cent l'étaient déjà en 2012. Ceci tient avant tout aux progrès réalisés dans les grands pays émergents asiatiques ainsi qu'en Amérique latine. Mais jusqu'ici, aucun effet substantiel de ces politiques n'a été constaté au niveau mondial. Alors que les émissions mondiales de CO<sub>2</sub> avaient augmenté de 2,5 milliards de tonnes au cours des années 1990, elles ont connu une hausse trois fois plus grande, à savoir de 6,8 milliards de tonnes, pendant les années 2000. Plus problématique encore est le fait que l'intensité de carbone<sup>2</sup> de la mise à dis-

<sup>2</sup> Emissions de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie

position d'énergie est remontée pendant les années 2000, alors qu'elle avait régulièrement diminué au cours des décennies précédentes. Ceci provient de l'augmentation de la part du charbon dans la production d'électricité de pays importants, tandis que celle du gaz naturel comparativement plus respectueux du climat est en recul, de même que celle du nucléaire.

En raison du problème du parasitisme mentionné plus haut, les politiques nationales du climat sont attrayantes avant tout quand elles comportent des avantages en plus de la réduction des émissions. Selon la situation, la diminution de la pollution locale de l'environnement, l'augmentation de la sécurité énergétique ou la promotion d'objectifs industriels est la principale motivation et peut même favoriser ou justifier une politique du cavalier seul. Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/WGIII/Chap.15) résume les principaux enseignements tirés des expériences faites avec les différents instruments nationaux de politique de réduction – réglementations, taxes sur les émissions et systèmes d'échange de quotas d'émission – quant à leur efficacité, leur efficience et leur applicabilité politique. L'effet de leur impact sur l'innovation technique est encore mal connu.

## Réglementations directes

Les réglementations directes, jusqu'ici mal vues des économistes, sont qualifiées maintenant, dans certaines conditions, de très efficaces en même temps que d'avantageuses en termes de coûts. Ceci vaut surtout lorsque des barrières non monétaires empêchent que les émetteurs de gaz à effet de serre réagissent à des instruments économiques. Tel est le cas notamment quand les coûts d'information sont élevés et que des structures d'incitation sont problématiques. Un exemple classique est le dilemme propriétaire-locataire : le propriétaire de l'immeuble peut répercuter les coûts sur les locataires, aussi n'est-il pas incité à investir dans des économies d'énergie à long terme. Les réglementations directes sont efficaces surtout quand elles s'appliquent à des sources d'émission dispersées et à des ménages. Les normes d'efficacité pour les bâtiments et les appareils ménagers constituent à cet effet un exemple réussi car elles ont conduit dans de nombreux pays à de substantielles réductions des émissions.

## Taxes sur les émissions

Des taxes sur les émissions existent depuis 20 ans dans une douzaine de pays – principalement en Scandinavie ; dans la moitié environ de ces pays, le taux de ces taxes est régulièrement revu à la hausse. De façon générale, ces taxes ont entraîné des réductions significatives des

émissions, tandis qu'elles n'ont pas causé jusqu'à maintenant d'impacts négatifs sur la compétitivité industrielle. Il convient cependant de souligner que dans la plupart des pays, l'industrie bénéficie d'allégements fiscaux ou est même exonérée. L'un des avantages des taxes est le fait qu'elles n'ont pas d'interactions problématiques avec d'autres instruments politiques, comme cela est le cas avec l'échange de quotas d'émission.

## Systèmes d'échange de quotas d'émission

Depuis une dizaine d'années, des systèmes d'échange de quotas d'émission (SEQE) ont été introduits en maints endroits. Mais ces dispositifs souffrent de limites supérieures d'émission trop laxistes. Ceci tient à la pression exercée sur les décideurs politiques par les lobbies bien organisés d'industries émettrices. En règle générale, une fois l'excédent de certificats d'émission connu, leur prix a rapidement chuté, ce qui montre que le marché réagit aux signaux de pénurie. Dans l'UE notamment, le recul des prix est imputable aussi aux effets d'autres mesures politiques qui ont réduit la demande de certificats – telles que le subventionnement d'énergies renouvelables qui a fait baisser la consommation de ressources fossiles.

Les expériences faites dans le monde avec l'utilisation d'outils nationaux de politique climatique peuvent être mises à profit dans la poursuite du développement de la palette suisse d'instruments. En tout et pour tout, il apparaît qu'une taxe sur les émissions, prélevée sur une part aussi grande que possible des émissions nationales de gaz à effet de serre, ainsi que l'achat de certificats de réduction issus de mécanismes de marché à l'étranger constituent, à moyen terme du moins, la combinaison d'instruments la plus efficace.

## Bibliographie

- Bruvoll A, Larsen M (2004) *Greenhouse gas emissions in Norway: do carbon taxes work?* Energy Policy 32: 493–505.
- Elzen den M, Hof A, Roelfsema M (2011) *The emissions gap between the Copenhagen pledges and the 2°C climate goal: Options for closing and risks that could widen the gap.* Global Environmental Change 21: 733–743.
- Fankhauser S, Hepburn C, Park J (2011) *Combining multiple climate policy instruments: how not to do it.* Climate Change Economics 1: 209–225.
- IPCC (2014) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).* Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Löfgren A, Wråke M, Hagberg T, Roth S (2014) *Why the EU ETS needs reforming: an empirical analysis of the impact on company investments.* Climate Policy 14: 537–558.
- Michaelowa A, Buen J (2012) *The CDM gold rush.* In: Michaelowa, Axel (ed.): *Carbon markets or climate finance?* Routledge, Abingdon: 1–38.

## 4.5 La coopération internationale

**Le changement climatique est un problème planétaire et la protection du climat une contribution à un bien public. Les réductions d'émission ont un prix économique pour le pays qui les réalise, tandis que tous les pays profitent du bénéfice tiré des mesures prises. C'est pourquoi une coopération internationale d'Etats et d'organisations non gouvernementales est absolument nécessaire en vue de réduire substantiellement les émissions mondiales de gaz à effet de serre et les impacts du changement climatique. La possibilité de tirer profit sans prestations propres comporte la tentation du parasitisme. Elle entrave notamment la coopération internationale, d'autant plus que des pays émergents défendent le point de vue que la responsabilité historique incombe en premier lieu aux Etats industrialisés. La coopération internationale actuelle est caractérisée par le recours croissant à des mesures unilatérales, la diversité institutionnelle, l'affaiblissement des obligations internationales et l'évolution de la distinction entre Etats industrialisés et pays en développement. Ceci se manifeste parfois dans l'utilisation unilatérale d'instruments politiques innovants, qui font de temps en temps l'objet de litiges dans le cadre de l'OMC, ainsi que dans le rôle grandissant d'acteurs locaux et non étatiques.**

Thomas Cottier (Université de Berne), Kateryna Holzer (Université de Berne)

### La diversité institutionnelle de la coopération internationale

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/ WGIII) souligne la diversité institutionnelle de la coopération internationale dans le domaine du changement climatique. Cette diversité découle en partie de la place croissante que des questions de politique climatique occupent dans d'autres forums et domaines de réglementation, par exemple en matière de développement durable, de commerce international et de droits humains. Des liens entre différents forums internationaux reflètent la nature du changement climatique comme problème transversal s'étendant au-delà des réglementations de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC). De tels liens ont des côtés positifs et négatifs. Sont à qualifier de négatifs des problèmes de cohérence, tels que des conflits de compétence, l'élection de juridiction (forum shopping)<sup>1</sup> ou des coûts de négociation plus élevés, qui entravent la réalisation d'objectifs climatiques.

Les conventions existantes et proposées sur la coopération internationale en matière de changement climatique se distinguent quant à leurs priorités, leur degré de centralisation et leur caractère plus ou moins contraignant. Ces conventions englobent des accords multilatéraux et l'harmonisation de politiques nationales et régionales. Elles portent sur la réduction de rejets nocifs, sur l'adaptation à des changements des conditions, sur les puits climatiques, le financement – et marginalement sur la formation, la prise de conscience et la communication.

Les instruments politiques sont en partie centralisés, par exemple par le Mécanisme de développement propre (MDP) (cf. chap. 4.4 Politiques climatiques dans le monde : Enseignements tirés de leur mise en œuvre, p. 202), et en partie décentralisés, notamment en matière d'échange de quotas d'émission (EQE), ce qui complique alors leur engagement dans la coopération internationale.

La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) est, à côté de l'ordre commercial mondial de l'OMC, le seul forum international de politique climatique jouissant d'une légitimité largement reconnue, due au fait que presque tous les Etats en sont membres. L'accord qu'elle a permis d'obtenir à Paris en décembre 2015 a encore renforcé cette légitimité. La limitation des obligations de réduction des émissions aux seuls Etats industrialisés a été levée ; ceci toutefois au prix d'un renoncement à des objectifs de réduction contraignants convenus au niveau international. Les Etats décident dès lors de façon autonome dans quelle mesure ils entendent contribuer à la réalisation de l'objectif visant à limiter le réchauffement à 2 degrés Celsius au maximum et de celui cherchant à le restreindre à 1,5 degrés Celsius par rapport aux valeurs moyennes préindustrielles. La question reste ouverte de savoir si cela fonctionnera et quel rôle d'autres forums devront assumer dorénavant plus activement, notamment en matière de réglementation commerciale.

### Le commerce mondial : un moyen de promouvoir la coopération

Le cinquième Rapport d'évaluation du GIEC (IPCC 2014/ WGIII) présente également le rôle que des incitations économiques, telles que les transferts monétaires, les méca-

<sup>1</sup> Exploitation de compétences parallèles de différents pays dans le but d'obtenir le jugement le plus favorable au demandeur.

| Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)  | Protocole de Kyoto   | Banque mondiale et programmes de l'ONU sur le changement climatique   |
|--|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Membre fondateur</li> <li>• S'engage à réduire ses émissions de 20-30 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990 (accord de Copenhague).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• S'engage dans le cadre de la première période d'engagement (2008-2012) à réduire ses émissions de 8 pour cent par rapport à 1990.</li> <li>• S'engage dans le cadre de la seconde période d'engagement (2013-2020) à réduire ses émissions de 15,8 pour cent par rapport à 1990.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Finance des initiatives REDD+ grâce auxquelles des pays en développement obtiennent des paiements de compensation s'ils apportent la preuve d'une diminution de la déforestation et de la dégradation des forêts sur leur territoire.</li> <li>• Finance le partenariat « CC:Learn » de l'ONU, qui promeut l'échange d'information et la formation en matière de changement climatique.</li> </ul> |

Figure 4.3: Contributions de la Suisse à une action mondiale en matière de changement climatique. La **convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC)**, signée en 1992, est un accord environnemental multilatéral qui comprend des stratégies internationales de lutte contre le changement climatique et qui encourage les Etats parties à prendre des mesures de protection du climat. Elle n'impose pas d'obligations juridiquement contraignantes à ses parties, mais constitue le cadre pour la négociation d'accords qui peuvent comporter des limitations contraignantes des émissions de gaz à effet de serre. Le **Protocole de Kyoto**, signé en 1997, est un accord environnemental multilatéral qui a été conclu en vertu de ladite Convention-cadre et qui comprend des obligations de réduction des gaz à effet de serre juridiquement contraignantes pour les Etats industrialisés. En résumé, la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques fixe des principes et des objectifs, tandis que le Protocole de Kyoto porte sur la mise en œuvre juridiquement contraignante de la Convention précitée. (Source: UNFCCC 2015)

nismes de marché, le transfert technologique et les mesures relatives au commerce, jouent dans l'extension de la coopération internationale en matière de changement climatique. Le commerce mondial notamment offre des incitations aussi bien positives que négatives pour promouvoir la coopération internationale dans la lutte contre le changement climatique. Les chapitres du Rapport d'évaluation du GIEC consacrés à la coopération internationale et régionale (IPCC 2014/WGIII/Chap.13 et Chap.14) insistent d'une part sur le potentiel de mesures commerciales pour encourager la transition vers une économie à faible intensité de carbone, et d'autre part sur de possibles conflits entre ces mesures et les règles définies par l'Organisation mondiale du commerce (OMC). L'intérêt se focalise aujourd'hui sur des questions touchant au subventionnement des énergies fossiles et renouvelables et à leur compatibilité avec les règles de l'OMC, ainsi que sur la prise en compte de procédés et méthodes de production. Les réglementations touchant de près le climat visent de plus en plus à ce que les produits (biens et services) soient obtenus de manière durable et en ménageant le climat. Dans le contexte des principes fondamentaux du traitement des résidents et du traitement préférentiel de produits équivalents et substituables, la question se pose de savoir jusqu'à quel point elles peuvent s'appuyer à cette fin sur la fiscalité ou sur l'aménagement de mesures tarifaires et non tarifaires. L'évolution du droit permet de toujours mieux tenir compte du développement durable (Holzer 2014; Conrad 2011). La question se pose notamment d'un renforcement du transfert technologique : des systèmes d'incitations sont en attente de négociation. Au niveau sectoriel, l'énergie est au cœur de futures négociations dans le cadre de l'OMC.

## Tendances de la coopération internationale

A part l'augmentation de la diversité institutionnelle, encore d'autres tendances de la coopération internationale en matière de changement climatique sont mises en évidence dans des études récentes (van Asselt et al. 2014; Nachmany et al. 2015):

- l'affaiblissement d'obligations de droit international,
- l'évolution de la distinction entre Etats industrialisés et pays en développement,
- l'utilisation d'instruments politiques innovants, tels que l'imposition de l'énergie à un taux différencié en fonction des procédés et méthodes de production ou que le recours à des certificats comme preuve de réductions de gaz à effet de serre,
- l'attention croissante accordée aux procédures judiciaires et à l'évolution du droit dans la jurisprudence de l'UE et de l'OMC,
- le développement des législations nationales et
- l'importance grandissante d'acteurs non étatiques, locaux et appartenant notamment au secteur privé.

Pendant ces dernières années, la coopération internationale en matière de changement climatique s'est caractérisée par un affaiblissement des obligations de droit international. Des comités informels, dont le nombre de membres et la représentativité sont limités et qui n'ont pas de véritable mandat de négociation, définissent de plus en plus l'agenda politique de cette coopération. Des initiatives régionales ou sectorielles bénéficient aujourd'hui d'un plus grand appui que des entreprises multilatérales à participation universelle. Des promesses volontaires remplacent toujours plus souvent les engagements contrai-

gnants. On observe plus fréquemment que des acteurs privés répondent à la place de tribunaux et de la communauté internationale à la question de savoir si telle ou telle règle est respectée (Asselt et al. 2014). On remarque en même temps une multiplication des lois nationales (Nachmany et al. 2015) et un déplacement des mesures vers l'échelon local. Aujourd'hui, des villes et des régions assument un rôle de premier plan dans la mise en œuvre autonome d'objectifs climatiques – c'est le cas notamment en Amérique du Nord. La diversité des réglementations nationales pourrait avoir pour effet d'augmenter à l'avenir le nombre des procédures de règlement des différends dans le cadre de l'OMC ou celui des accords préférentiels, là où des réglementations autonomes sont liées à des limitations du commerce. Il en va de même des investissements dans le cadre d'accords bilatéraux de protection des investissements ou d'accords commerciaux préférentiels, lorsque leurs rendements sont limités après coup par des réglementations et exigences motivées par la politique climatique.

## Résultats de la coopération internationale en rapport avec le changement climatique

Selon le GIEC, les politiques en matière de changement climatique peuvent être évaluées au moyen de quatre critères (IPCC 2014/WGII) :

- l'efficacité environnementale,
- la performance macroéconomique,
- les influences de la distribution et
- la faisabilité institutionnelle.

Ces quatre critères, dont le degré de satisfaction dépend de la forme et des mécanismes régulateurs de la mesure politique proposée, sont mis en balance dans l'évaluation. Il faut par exemple trouver un équilibre entre une large participation et la faisabilité institutionnelle d'un objectif écologique ambitieux. Le résultat de cette appréciation peut dépendre de prestations financières, de mécanismes étatiques de mise en œuvre et de la répartition des efforts de réduction des émissions.

## Le Protocole de Montréal

Par rapport aux critères mentionnés plus haut, le Protocole de Montréal, signé en 1987 dans le but de protéger la couche d'ozone stratosphérique, peut être qualifié de succès. Limité à l'élimination d'un petit nombre de substances, qui ne concernaient que peu d'industries et pour lesquelles il existait des produits de substitution, cet accord a eu pour effet secondaire une importante réduction de gaz à effet de serre. L'expérience faite avec le Protocole de Montréal peut être utile au développement d'un ac-

cord international sur le changement climatique, car elle a montré que des transferts financiers et techniques, mais également la possibilité de sanctions commerciales, stimulent la participation à un accord international de protection de l'environnement focalisé sur un domaine d'application sectoriel.

## Le Protocole de Kyoto

Le Protocole de Kyoto, signé en 1997, est la première étape contraignante vers la mise en œuvre des principes et des objectifs de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, adoptée en 1992. Il a eu moins de succès qu'attendu. Son influence limitée sur la mise en œuvre d'objectifs de réduction et sur l'environnement tient d'une part au fait que les pays de l'annexe I<sup>2</sup> n'ont pas tous participé ou n'ont pas tous respecté pleinement l'accord. Cette influence restreinte est attribuable d'autre part à la prise en compte de réductions d'émission dites « hot air »<sup>3</sup> dans des pays de l'annexe I. En outre, le mécanisme de développement propre (MDP), convenu dans le cadre du Protocole de Kyoto, n'a pas produit le transfert souhaité de technique et de savoir. Enfin, le champ d'application du protocole ne couvre pas les émissions des pays en développement et émergents, qui ne figurent pas dans l'annexe I. Or, leurs émissions ont fortement augmenté pendant la dernière décennie et dépassent maintenant celles des pays de l'annexe I.

## L'accord de Paris sur le climat

Cet accord, signé le 22 avril 2016 par un grand nombre d'Etats, prend, à partir de 2020, la relève du Protocole de Kyoto dont l'effet était limité aux Etats industrialisés. Il complète les promesses faites antérieurement dans le cadre des accords de Copenhague et de Cancún. Il comprend des dispositions détaillées au sujet des réductions, de l'adaptation, du financement, du transfert technologique, des dédommages, de la transparence et de la coopération au développement. Son acquis majeur est, comme mentionné, l'inclusion des pays émergents, dont la participation est nécessaire aujourd'hui pour obtenir une réduction efficace des émissions ; en contrepartie, les pays industrialisés ont fait des promesses de financement dans le cadre d'une responsabilité partagée et différenciée. Tout en maintenant la référence à une préoccupation com-

<sup>2</sup> L'annexe I de la Convention-cadre sur le climat comprend les Etats qui se sont engagés dans le cadre de cette convention à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. En font partie notamment les Etats de l'OCDE ainsi que les pays en transition d'Europe centrale et orientale.

<sup>3</sup> La désindustrialisation de l'Europe de l'Est a entraîné une baisse des émissions sans mesures actives de protection du climat. De ce fait, les besoins en droits d'émission ont été surestimés en 1990, année de référence, ce qui a conduit à un excédent de certificats pouvant être vendus sur le marché des émissions.

mune à l'humanité, l'accord comprend le principe de la responsabilité partagée, mais différenciée, qui permet une approche souple et décentralisée. Les objectifs d'émission mentionnés plus haut sont remplis par des engagements unilatéraux dont le statut en matière de droit international sera controversé. Il est trop tôt pour évaluer cet accord. Le fait essentiel est le signal positif qu'une large participation et un large consensus de la communauté internationale au sujet des objectifs d'émission donne aux marchés financiers pour promouvoir des flux financiers favorables au climat. Ceux-ci doivent soutenir les investissements dans les énergies renouvelables et contribuer au retrait des énergies fossiles. L'accord peut servir de base au développement d'instruments destinés au financement et au transfert technologique et être un outil de référence dans le contexte de différends commerciaux de l'OMC.

## Participation de la Suisse à la coopération internationale

La Suisse est fortement engagée sur le plan international dans les efforts de protection du climat. Elle participe activement à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, au Protocole de Kyoto et à d'autres organisations, accords et programmes en rapport avec le changement climatique (fig. 4.3). Elle a signé l'accord de Paris le 22 avril 2016.

En ce qui concerne les objectifs de réduction des gaz à effet de serre, la position de la Suisse est comparable à celle de l'UE. Pendant la première période d'engagement du Protocole de Kyoto (2008-2012), la Suisse a souscrit aux mêmes obligations légales que l'UE : une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 8 pour cent en moyenne par rapport au niveau de 1990. En outre, la Suisse s'est engagée au niveau du droit international à participer à la seconde période d'engagement du Protocole de Kyoto (2013-2020). Elle fait partie des pays de l'annexe I qui ont pris des engagements chiffrés de limitation et de réduction des émissions (ECLRE). Pour la seconde période d'engagement, la Suisse a anticipé un niveau ECLRE de 84,2. Ce chiffre est déduit d'un objectif de réduction des émissions de 20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990 : cet objectif correspond à une réduction de 15,8 pour cent en moyenne des années 2013 à 2020 (cf. chap. 4.2 La politique climatique suisse, p. 194).

## La Suisse a pris divers engagements

La Suisse soutient l'objectif des 2 degrés Celsius et s'est montrée prête à réduire ses émissions de jusqu'à 30 pour cent d'ici 2020 par rapport à 1990 pour autant que d'autres pays industrialisés s'engagent pour des objectifs

équivalents et que les pays émergents contribuent à la réduction des rejets dans la mesure de leurs possibilités. Dans le cadre de l'accord de Paris, la Suisse vise une réduction de ses émissions de 50 pour cent jusqu'en 2030 et de 70-85 pour cent jusqu'en 2050. Ces chiffres prennent en compte non seulement les réductions réalisées à l'intérieur des frontières, mais aussi celles obtenues à l'étranger (UNFCCC 2015).

La Suisse participe aussi au mécanisme REDD+ de réduction des émissions de gaz à effet de serre dus à la déforestation. Dans le cadre de REDD+, elle a contribué jusqu'ici pour 20 millions de francs suisses à la Forest Carbon Partnership Facility (FCPF, Fonds de partenariat sur le carbone forestier) de la Banque mondiale et à des projets bilatéraux. La Suisse soutient ainsi les pays en développement dans d'importants travaux de base et les prépare au mécanisme REDD+. Elle doit en outre faire des efforts d'adaptation au changement climatique ; elle encourage des approches innovantes pour cette adaptation et pour le financement de projets climatiques dans des pays en développement.

Pour les négociations internationales, la Suisse fait partie de l'Environmental Integrity Group avec le Mexique, la Corée du Sud, Monaco et le Liechtenstein. Ce groupe a défendu l'idée d'un accord juridiquement contraignant, efficace et équitable pour la période après 2020, associant chaque Etat en fonction de sa responsabilité et capacité momentanées. Le groupe a insisté sur la nécessité de prendre des mesures d'adaptation et voulait que les économies développées et émergentes assument une plus grande responsabilité financière à l'égard des pays en développement (Ingold & Pflieger 2016). Ces objectifs n'ont été réalisés que partiellement par l'accord de Paris, mais ils restent la ligne directrice pour la poursuite des travaux dans le contexte de la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques et pour les modalités de mise en œuvre de l'accord de Paris.

La Suisse a clairement soutenu la création et la mise en œuvre du financement à court terme de projets climatiques dans les pays en développement à hauteur de 30 milliards de dollars US pour les années 2010 à 2012. Elle s'est également prononcée en faveur d'un soutien financier à long terme et croissant par le Fonds vert pour le climat (Green Climate Fund, GCF), créé récemment. Le GCF a été institué par les membres de la Convention-cadre sur les changements climatiques dans le but de mettre des moyens financiers à disposition de projets de réduction des gaz à effet de serre et d'adaptation au changement climatique réalisés dans des pays en développement.

## Bibliographie

- Conrad C (2011) **Processes and Production Methods (PPMs) in WTO Law: Interfacing Trade and Social Goals.** Cambridge University Press, Cambridge.
- Holzer K (2014) **Carbon-related Border Adjustment and WTO Law.** Edward Elgar, Camberley Surrey, 352 pp.
- Ingold K, Pflieger G (2016) **Two levels, two strategies: explaining the gap between Swiss national and international responses towards Climate Change.** Environmental Policy Analysis Journal 2: 20–38.
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** Chapter 13 «International Cooperation:Agreements and Instruments». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- IPCC (2014) **Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).** Chapter 14 «Regional Development and Cooperation». [www.ipcc.ch/report/ar5/wg3](http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3)
- Nachmany M, Frankhauser S, Davidová J, Kingsmill N, Landesman T, Roppongi H, Schleifer P, Setzer J, Sharman A, Singleton CS, Sundaresan J, Townshend T (2015) **The Global Climate Legislation Study.** LSE, Grantham Research Institute.
- UNFCCC (2011) **FCCC/CP/2011/9/Add.1, Decision 1/CP.17, Establishment of an Ad Hoc Working Group on the Durban Platform for Enhanced Action.**
- UNFCCC (2015) **Switzerland's intended nationally determined contribution (INDC) and clarifying information.** [www4.unfccc.int/submissions/indc](http://www4.unfccc.int/submissions/indc)
- van Asselt H, Mehling M, Kehler SC (2014) **The Changing Architecture of International Climate Change Law.** In: Van Calster G, Vandenberghe W, Reins L (eds.), *Research Handbook on Climate Change Mitigation Law.* Edward Elgar, Camberley Surrey.

## Expertes et experts

### Dr Stephan Bader

Collaborateur scientifique, domaine Analyses et prévisions, Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), aéroport de Zurich

### Prof. Dr Thomas Bernauer

Professeur de sciences politiques à l'Institut pour les décisions environnementales (IED) de l'EPF de Zurich

### Dr Peter Brang

Responsable du programme de recherche «Forêts et changements climatiques» de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

### Dr Reto Burkard

Chef de la section Politique climatique de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

### Melanie Butterling

Cheffe de projet, Office fédéral du développement territorial (ARE)

### Dr Pierluigi Calanca

Chercheur senior, groupe de recherche «Climat et hygiène de l'air» d'Agroscope, Zurich

### Daniel Felder

Collaborateur scientifique, domaine spécialisé Systèmes agro-environnementaux et éléments fertilisants, Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne

### Prof. Dr em. Heinz Gutscher

Président de ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne  
Professeur (émérite) de psychologie sociale à l'Université de Zurich

### Prof. Dr em. Wilfried Haeberli

Professeur (émérite) de géographie, spécialiste de géographie physique, Institut de géographie de l'Université de Zurich

### Dr Stefan Hirschberg

Chef du Laboratoire d'analyse des systèmes énergétiques (LEA/ENE) de l'Institut Paul Scherrer (PSI), Villigen

### Prof. Dr Martin Hoelzle

Professeur de géographie physique, Département des géosciences de l'Université de Fribourg

### Dr Roland Hohmann

Chef de la section Rapports climatiques et adaptation de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

### Prof. Dr Fortunat Joos

Professeur de physique climatique et environnementale, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

### Martin Kamber

Jusqu'en juin 2016: Directeur de l'Union intercantonale de réassurance (UIR), Berne

### Dr Pamela Köllner

Collaboratrice scientifique, section Rapports climatiques et adaptation aux changements de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

### Prof. Dr em. Dr DDr h.c. Christian Körner

Professeur (émérite) de botanique, Département des sciences de l'environnement de l'Université de Bâle

### Dr Michael Kost

Collaborateur scientifique, section Analyses et perspectives de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), Ittigen

### Christian Küchli

Collaborateur scientifique, section Prestations forestières et entretien des forêts de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

### Dr Mark Liniger

Responsable de l'équipe Prévision du climat de l'Office fédéral de météorologie et de climatologie (MétéoSuisse), aéroport de Zurich

### Dr Jon-Andri Lys

Directeur de la Commission pour le partenariat scientifique avec les pays en développement (KFPE), Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

### Dr Nicole Mathys

Responsable du service Bases, Office fédéral du développement territorial (ARE)

### Prof. Dr Etienne Piguet

Professeur de géographie des mobilités à l'Institut de géographie de l'Université de Neuchâtel

### Prof. Dr Christoph C. Raible

Professeur de physique climatique et environnementale à l'Institut de physique de l'Université de Berne

### Dr Christoph Ritz

Jusqu'en mars 2016: Directeur de ProClim – Forum pour le climat et les changements globaux de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

### Dr Stefan Ritz

Analyste des catastrophes naturelles, Tokio Millennium Re AG, Zurich

### Dr Christian Rixen

Collaborateur scientifique, groupe de recherche «Ecosystèmes montagnards», WSL Institut fédéral pour l'étude de la neige et des avalanches (SLF), Davos Dorf

### Prof. Dr Martin Röösli

Professeur à l'Institut tropical et de santé publique de l'Université de Bâle

### Dr Thomas Scheurer

Directeur de la Commission interacadémique Recherche alpine (ICAS), Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), Berne

### Dr Rolf Schmitz

Chef de la section Recherche énergétique de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN), Ittigen

### Prof. Dr Werner K. Schmutz

Directeur de l'Observatoire physico-météorologique de Davos / Centre mondial du rayonnement, Davos Dorf

### Prof. Dr Konrad Steffen

Directeur de l'Institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), Birmensdorf

### Prof. Dr Thomas F. Stocker

Professeur de physique climatique et environnementale à l'Institut de physique de l'Université de Berne  
Coprésident du Groupe de travail I - cinquième Rapport d'évaluation du GIEC

### Prof. Dr Philippe Thalmann

Professeur d'économie de l'environnement naturel et construit, Institut d'architecture et de la ville (IA) de l'EPF de Lausanne

### Dr Damiano Urbinello

Collaborateur scientifique, direction Politique de la santé, Office fédéral de la santé publique (OFSP), Liebefeld

### Dr David Volken

Collaborateur scientifique, section Prévision hydrologique, Département Hydrologie de l'Office fédéral de l'environnement (OFEV), Ittigen

### Prof. Dr Rolf Weingartner

Professeur d'hydrologie, Institut de géographie, Centre Oeschger pour la recherche sur le changement climatique de l'Université de Berne

### Prof. Dr Heini Wernli

Professeur de dynamique atmosphérique à l'Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Prof. Dr Martin Wild

Professeur spécialiste des changements climatiques globaux à l'Institut pour l'atmosphère et le climat (IAC) de l'EPF de Zurich

### Dr Christine Zundel

Collaboratrice scientifique, secteur Systèmes agro-environnementaux et éléments fertilisants, Office fédéral de l'agriculture (OFAG), Berne

## Référencement GIEC

| Référencement complet selon GIEC  | Référencement en fin de chapitre  | Référencement dans le texte courant  |
|---|---|--|
| <b>WGI</b>  |   |  |
| <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp., doi:10.1017/CBO9781107415324. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Summary for Policymakers</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-30, doi:10.1017/CBO9781107415324.004. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Hartmann DL, Klein Tank AMG, Rusticucci M, Alexander LV, Brönnimann S, Charabi Y, Dentener FJ, Dlugokencky EJ, Easterling DR, Kaplan A, Soden BJ, Thorne PW, Wild M, Zhai PM (2013) <b>Observations: Atmosphere and Surface</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 159-254, doi:10.1017/CBO9781107415324.008. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Rhein M, Rintoul SR, Aoki S, Campos E, Chambers D, Feely RA, Gulev S, Johnson GC, Josey SA, Kostianoy A, Mauritzen C, Roemmich D, Talley LD, Wang F (2013) <b>Observations: Ocean</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 255-316, doi:10.1017/CBO9781107415324.010. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Vaughan DG, Comiso JC, Allison I, Carrasco J, Kaser G, Kwok R, Mote P, Murray T, Paul F, Ren J, Rignot E, Solomina O, Steffen K, Zhang T (2013) <b>Observations: Cryosphere</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 317-382, doi:10.1017/CBO9781107415324.012. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Masson-Delmotte V, Schulz M, Abe-Ouchi A, Beer J, Ganopolski A, González Rouco JF, Jansen E, Lambek K, Luterbacher J, Naish T, Osborn T, Otto-Bliesner B, Quinn T, Ramesh R, Rojas M, Shao X, Timmermann A (2013) <b>Information from Paleoclimate Archives</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 383-464, doi:10.1017/CBO9781107415324.013. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni RB, Piao S, Thornton P (2013) <b>Carbon and Other Biogeochemical Cycles</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 465-570, doi:10.1017/CBO9781107415324.015. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>Bindoff NL, Stott PA, AchutaRao KM, Allen MR, Gillett N, Gutzler D, Hansingo K, Hegerl G, Hu Y, Jain S, Mokhov II, Overland J, Perlwitz J, Sebbari R, Zhang X (2013) <b>Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 867-952, doi:10.1017/CBO9781107415324.022. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> | <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Summary for Policymakers (SPM). www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 2 «Observations: Atmosphere and Surface». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 3 «Observations: Ocean». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 4 «Observations: Cryosphere». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 5 «Information from Paleoclimate Archives». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 6 «Carbon and Other Biogeochemical Cycles». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WGI)</b>. Chapter 10 «Detection and Attribution of Climate Change: from Global to Regional». www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</p> | <p>(IPCC 2013/WGI)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/SPM)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.2)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.3)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.4)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.5)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.6)</p> <p>(IPCC 2013/WGI/Chap.10)</p> |

|  |   |  |
|--|---|--|
| <p>Kirtman B, Power SB, Adedoyin JA, Boer GJ, Bojariu R, Camilloni I, Doblas-Reyes FJ, Fiore AM, Kimoto M, Meehl GA, Prather M, Sarr A, Schär C, Sutton R, van Oldenborgh GJ, Vecchi G, Wang HJ (2013) <b>Near-term Climate Change: Projections and Predictability</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 953–1028, doi:10.1017/CBO9781107415324.023. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p> <p>Collins M, Knutti R, Arblaster J, Dufresne J-L, Fichefet T, Friedlingstein P, Gao X, Gutowski WJ, Johns T, Krinner G, Shongwe M, Tebaldi C, Weaver AJ, Wehner M (2013) <b>Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1029–1136, doi:10.1017/CBO9781107415324.024. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p> <p>Church JA, Clark PU, Cazenave A, Gregory JM, Jevrejeva S, Levermann A, Merrifield MA, Milne MA, Nerem RS, Nunn PD, Payne AJ, Pfeffer WT, Stammer D, Unnikrishnan AS (2013) <b>Sea Level Change</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1137–1216, doi:10.1017/CBO9781107415324.026. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p> | <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)</b>. Chapter 11 «Near-term Climate Change: Projections and Predictability». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>  | <p>(IPCC 2013/WG1/Chap.11)</p>   |
| <p>Christensen JH, Krishna Kumar K, Aldrian E, An S-I, Cavalcanti IFA, de Castro M, Dong W, Goswami P, Hall A, Kanyanga JK, Kitoh A, Kossin J, Lau N-C, Renwick J, Stephenson DB, Xie S-P, Zhou T (2013) <b>Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1217–1308, doi:10.1017/CBO9781107415324.028. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p> <p>Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Alexander LV, Allen SK, Bindoff NL, Bréon F-M, Church JA, Cubasch U, Emori S, Forster P, Friedlingstein P, Gillett N, Gregory JM, Hartmann DL, Jansen E, Kirtman B, Knutti R, Krishna Kumar K, Lemke P, Marotzke J, Masson-Delmotte V, Meehl GA, Mokhov II, Piao S, Ramaswamy V, Randall D, Rhein M, Rojas M, Sabine C, Shindell D, Talley LD, Vaughan DG, Xie S-P (2013) <b>Technical Summary</b>. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker TF, Qin D, Plattner G-K, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 33–115, doi:10.1017/CBO9781107415324.005. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>   | <p>IPCC (2013) <b>Climate Change 2013: The Physical Science Basis (WG1)</b>. Chapter 14 «Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1">www.ipcc.ch/report/ar5/wg1</a></p>  | <p>(IPCC 2013/WG1/Chap.13)</p>   |
| <p><b>WGII</b></p>   | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1132 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> |
| <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability</b>. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 688 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII)</b>. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>  | <p>(IPCC 2014/WGII)</p>  |

|  |   |                                |
|--|---|--------------------------------|
| <p>IPCC (2014) <b>Summary for Policymakers.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1–32. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>   | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                        | <p>(IPCC 2014/WGII/SPM)</p>    |
| <p>Jiménez Cisneros BE, Oki T, Arnell NW, Benito G, Cogley JG, Döll P, Jiang T, Mwakalila SS (2014) <b>Freshwater resources.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229–269. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                     | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 3 «Freshwater resources». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                      | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.3)</p> |
| <p>Settele J, Scholes R, Betts R, Bunn SE, Leadley P, Nepstad D, Overpeck JT, Taboada MA (2014) <b>Terrestrial and inland water systems.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 229–269. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>         | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 4 «Terrestrial and inland water systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>      | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.4)</p> |
| <p>Wong PP, Losada IJ, Gattuso J-P, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, Saito Y, Sallenger A (2014) <b>Coastal systems and low-lying areas.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 361–409. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>        | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 5 «Coastal systems and low-lying areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>       | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.5)</p> |
| <p>Pörtner H-O, Karl D, Boyd PW, Cheung W, Lluch-Cota SE, Nojiri Y, Schmidt DN, Zavialov P (2014) <b>Ocean systems.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 411–484. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                              | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 6 «Ocean systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                             | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.6)</p> |
| <p>Porter JR, Xie L, Challinor AJ, Cochrane K, Howden SM, Iqbal MM, Lobell DB, Travassos MI (2014) <b>Food security and food production systems.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 485–533. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 7 «Food security and food production systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.7)</p> |
| <p>Revi A, Satterthwaite DE, Aragón-Durand F, Corfee-Morlot J, Kiunsi RBR, Pelling M, Roberts DC, Solecki W (2014) <b>Urban areas.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535–612. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>               | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 8 «Urban Areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                               | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.8)</p> |
| <p>Dasgupta P, Morton JF, Dodman D, Karapinar B, Meza F, Rivera-Ferre MG, Toure Sarr A, Vincent KE (2014) <b>Rural areas.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 613–657. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                        | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 9 «Rural Areas». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                               | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.9)</p> |

|  |   |                                 |
|--|---|---------------------------------|
| <p>Arent DJ, Tol RSJ, Faust E, Hella JP, Kumar S, Strzepek KM, Tóth FL, Yan D (2014) <b>Key economic sectors and services.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 659–708.</p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 10 «Key economic sectors and services». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                  | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.10)</p> |
| <p>Smith KR, Woodward A, Campbell-Lendrum D, Chadee DD, Honda Y, Liu Q, Olwoch JM, Revich B, Sauerborn R (2014) <b>Human health: impacts, adaptation, and co-benefits.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 709–754. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>   | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 11 «Human health: impacts, adaptation, and co-benefits». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.11)</p> |
| <p>Adger WN, Pulhin JM, Barnett J, Dabelko GD, Hovelsrud GK, Levy M, Oswald Spring Ú, Vogel CH (2014) <b>Human security.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 755–791. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>   | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 12 «Human security». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                                     | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.12)</p> |
| <p>Olsson L, Opondo M, Tschakert P, Agrawal A, Eriksen SH, Ma S, Perch LN, Zakielleen SA (2014) <b>Livelihoods and poverty.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 793–832. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 13 «Livelihoods and poverty». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>                            | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.13)</p> |
| <p>Cramer W, Yohe GW, Auffhammer M, Huggel C, Molau U, Silva Dias MAF, Solow A, Stone DA, Tibig L (2014) <b>Detection and attribution of observed impacts.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 979–1037. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 18 «Detection and attribution of observed impacts». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>      | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.18)</p> |
| <p>Kovats RS, Valentini R, Bouwer LM, Georgopoulou E, Jacob D, Martin E, Rounsevell M, Soussana J-F (2014) <b>Europe.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Barros, V.R., C.B. Field, D.J. Dokken, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1267–1326.</p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Chapter 23 «Europe». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>   | <p>(IPCC 2014/WGII/Chap.23)</p> |
| <p>Field CB, Barros VR, Mach KJ, Mastrandrea MD, van Aalst M, Adger WN, Arent DJ, Barnett J, Betts R, Bilir TE, Birkmann J, Carmin J, Chadee DD, Challinor AJ, Chatterjee M, Cramer W, Davidson DJ, Estrada YO, Gattuso J-P, Hijikata Y, Hoegh-Guldberg O, Huang H-Q, Insarow GE, Jones RN, Kovats RS, Romero Lankao P, Larsen JN, Losada IJ, Marengo JA, McLean RF, Mearns LO, Mechler R, Morton JF, Niang I, Oki T, Olwoch JM, Opondo M, Poloczanska ES, Pörtner H-O, Redsteer MH, Reisinger A, Revai A, Schmidt DN, Shaw MR, Solecki W, Stone DA, Stone JMR, Strzepek KM, Suarez AG, Tschakert P, Valentini R, Vicuña S, Villamizar A, Vincent KE, Warren R, White LL, Wilbanks TJ, Wong PP, Yohe GW (2014) <b>Technical Summary.</b> In: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken S, Mastrandrea PR, White LL (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 35–94. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p> | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (WGII).</b> Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg2">www.ipcc.ch/report/ar5/wg2</a></p>  | <p>(IPCC 2014/WGII/TS)</p>      |

|   |   |                           |
|---|---|---------------------------|
| <b>WGIII</b>  |   |                           |
| IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change</b> . Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>  | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>   | (IPCC 2014/WGIII)         |
| IPCC (2014) <b>Summary for Policymakers</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>  | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>                                     | (IPCC 2014/ WGIII/SPM)    |
| Bruckner T, Bashmakov IA, Mulugetta Y, Chun H, de la Vega Navarro A, Edmonds J, Faij A, Fungtammasan B, Garg A, Hertwich E, Honnery D, Infield D, Kainuma M, Khennas S, Kim S, Nimir HB, Riahi K, Strachan N, Wiser R, Zhang X (2014) <b>Energy Systems</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.511–598. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>              | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Chapter 7 «Energy Systems». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>   | (IPCC 2014/WGIII/Chap.7)  |
| Sims R, Schaeffer R, Creutzig F, Cruz-Núñez X, D'Agosto M, Dimitriu D, Figueroa Meza MJ, Fulton L, Kobayashi S, Lah O, McKinnon A, Newman P, Ouyang M, Schauer JJ, Sperling D, Tiwari G (2014) <b>Transport</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 599–670. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>   | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Chapter 8 «Transport». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>  | (IPCC 2014/WGIII/Chap.8)  |
| Smith P, Bustamante M, Ahammad H, Clark H, Dong H, Elsiddig EA, Haberl H, Harper R, House J, Jafari M, Masera O, Mbow C, Ravindranath NH, Rice CW, Robledo Abad C, Romanovskaya A, Sperling F, Tubiello F (2014) <b>Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.811–922. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a> | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Chapter 11 «Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU)». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>      | (IPCC 2014/WGIII/Chap.11) |
| Stavins R, Zou J, Brewer T, Conte Grand M, den Elzen M, Finus M, Gupta J, Höhne N, Lee M-K, Michaelowa A, Paterson M, Ramakrishna K, Wen G, Wiener J, Winkler H (2014) <b>International Cooperation: Agreements and Instruments</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp.1001–1082. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>                                    | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Chapter 13 «International Cooperation: Agreements and Instruments». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a> | (IPCC 2014/WGIII/Chap.13) |
| Agrawala S, Klasen S, Acosta Moreno R, Barreto L, Cottier T, Guan D, Gutierrez-Espeleta EE, Gámez Vázquez AE, Jiang L, Kim YG, Lewis J, Messouli M, Rauscher M, Uddin N, Venables A (2014) <b>Regional Development and Cooperation</b> . In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, Strechow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1083–1140. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>                                | IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII)</b> . Chapter 14 «Regional Development and Cooperation». <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a>                  | (IPCC 2014/WGIII/Chap.14) |

|   |  |                                |
|---|--|--------------------------------|
| <p>Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Kadner S, Minx JC, Brunner S, Agrawala S, Baiocchi G, Bashmakov IA, Blanco G, Broome J, Bruckner T, Bustamante M, Clarke L, Conte Grand M, Creutzig F, Cruz-Núñez X, Dhakal S, Dubash NK, Eickemeier P, Farahani E, Fischedick M, Fleurbaey M, Gerlagh R, Gómez-Echeverri L, Gupta S, Harnisch J, Jiang K, Jotzo F, Kartha S, Klasen S, Kolstad C, Krey V, Kunreuther H, Lucon O, Masera O, Mulugetta Y, Norgaard RB, Patt A, Ravindranath NH, Riahi K, Roy J, Sagar A, Schaeffer R, Schröder S, Seto KC, Seyboth K, Sims R, Smith P, Somanathan E, Stavins R, Strehlow C von, Stern T, Sugiyama T, Suh S, Ürge-Vorsatz D, Urama K, Venables A, Victor DG, Weber E, Zhou D, Zou J, Zwickel T (2014) <b>Technical Summary. In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change.</b> Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schröder S, Strehlow C von, Zwickel T, Minx JC (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p> | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (WGIII).</b> Technical Summary (TS). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3">www.ipcc.ch/report/ar5/wg3</a></p>  | <p>(IPCC 2014/WGIII/TS)</p>    |
| <p><b>Synthesis Report</b></p> <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report.</b> Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/re20port/ar5/syr">www.ipcc.ch/re20port/ar5/syr</a></p>   | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR).</b> <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>  | <p>(IPCC 2014/SYR)</p>         |
| <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report.</b> Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri RK, Meyer LA (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>  | <p>IPCC (2014) <b>Climate Change 2014: Synthesis Report (SYR).</b> Summary for Policymakers (SPM). <a href="http://www.ipcc.ch/report/ar5/syr">www.ipcc.ch/report/ar5/syr</a></p>  | <p>(IPCC 2014/SYR/SPM)</p>     |
| <p><b>Special Reports</b></p> <p>IPCC (2012) <b>Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.</b> A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 582 pp. <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>   | <p>IPCC (2012) <b>Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).</b> <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>  | <p>(IPCC 2012/SREX)</p>        |
| <p>Seneviratne SI, Nicholls N, Easterling D, Goodess CM, Kanae S, Kossin J, Luo Y, Marengo J, McInnes K, Rahimi M, Reichstein M, Sorteberg A, Vera C, Zhang X (2012) <b>Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment.</b> In: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation [Field CB, Barros V, Stocker TF, Qin D, Dokken DJ, Ebi KL, Mastrandrea MD, Mach KJ, Plattner G-K, Allen SK, Tignor M, Midgley PM (eds.)]. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 109–230. <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p>   | <p>IPCC (2012) <b>Special Report «Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation» (SREX).</b> Chapter 3 «Changes in climate extremes and their impacts on the natural physical environment». <a href="http://www.ipcc.ch/report/srex">www.ipcc.ch/report/srex</a></p> | <p>(IPCC 2012/SREX/Chap.3)</p> |

## **Qui sommes-nous?**

Les Académies suisses des sciences mettent les sciences en réseau sur le plan régional, national et international. Elles s'engagent particulièrement dans les domaines de la reconnaissance précoce, de l'éthique et du dialogue entre science et société.

Les Académies suisses des sciences regroupant les quatre académies scientifiques suisses:

- Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT)
- Académie suisse des sciences médicales (ASSM)
- Académie suisse des sciences humaines et sociales (ASSH)
- Académie suisse des sciences techniques (SATW)

ainsi que les centres de compétences

- Centre d'évaluation des choix technologiques (TA-SWISS)
- Fondation Science et Cité

## **SCNAT – un savoir en réseau au service de la société**

L'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT) s'engage à l'échelle régionale, nationale et internationale pour l'avenir de la science et de la société. Elle renforce la prise de conscience à l'égard des sciences naturelles afin que celles-ci deviennent un pilier central de notre développement culturel et économique. Sa large implantation dans le milieu scientifique en fait un partenaire représentatif pour la politique. La SCNAT œuvre à la mise en réseau des sciences, met son expertise à disposition, encourage le dialogue entre la science et la société, identifie et évalue les progrès scientifiques de manière à construire et à renforcer les bases de travail de la prochaine génération de chercheuses et de chercheurs. Elle fait partie des Académies suisses des sciences.

**ProClim est le forum pour le climat et les changements globaux** de l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT). Il sert d'interface dans la communication entre la science, l'administration, la politique, l'économie et le public.

