

# OcCC

Organe consultatif sur les changements climatiques  
Beratendes Organ für Fragen der Klimaänderung

## **Le climat change, en Suisse aussi**

**Les points principaux du**

**troisième rapport du GIEC sur l'état des connaissances,  
du point de vue de la Suisse**

---

# Impressum

---

## **Auteurs du rapport**

|                           |  |
|---------------------------|--|
| Christian Albrecht        | Office fédéral du développement territorial ODT, Berne           |
| Peter Baccini             | Stoffhaushalt und Entsorgungstechnik, EPF Zurich                 |
| Andrea Baranzini          | Université de Genève et École Polytechnique Fédérale de Lausanne |
| Martin Beniston           | Institut de Géographie, Université de Fribourg                   |
| Harald Bugmann            | Département Forstwissenschaften, EPF Zurich                      |
| Thomas Bürki              | Thomas Bürki GmbH, Benglen                                       |
| Samuel Fankhauser         | European Bank for Reconstruction and Development, London         |
| Andreas Fischlin          | Institut für Terrestrische Ökologie, EPF Zurich                  |
| Jürg Fuhrer               | Eidg. Forschungsanstalt für Agrarökologie und Landbau, Zurich    |
| Yves Gonseth              | Centre suisse de cartographie de la faune, Neuchâtel             |
| Sabine Güsewell           | Geobotanisches Institut, EPF Zurich                              |
| Roland Hohmann            | ProClim-, Berne  |
| Josef Janssen             | Institut für Wirtschaft und Ökologie, Université de Saint-Gall   |
| Fortunat Joos             | Klima- und Umweltphysik, Université de Berne                     |
| Wolfram Kägi              | B.S.S. Economic Consultants, Bâle                                |
| Daniel K. Keuerleber-Burk | MeteoSuisse, Zurich  |
| Nino Künzli               | Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Université de Bâle    |
| Lucy Oglesby              | Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Université de Bâle    |
| Pascal Previdoli          | Office fédéral de l'énergie, Berne                               |
| Bruno Schädler            | Office fédéral des eaux et de la géologie, Berne                 |
| Thomas Stocker            | Klima- und Umweltphysik, Université de Berne                     |

## **Experts**

|                    |   |
|--------------------|---|
| Wilfried Haerberli | Geographisches Institut, Université de Zurich                 |
| Eberhard Jochem    | Center for Energy Policy and Economics, EPF Zurich            |
| Atsumu Ohmura      | Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, EPF Zurich |
| Christoph Schär    | Institut für Atmosphären- und Klimawissenschaften, EPF Zurich |
| Heinz Wanner       | Geographisches Institut, Université de Berne                  |
| Alexander Wokaun   | Paul Scherrer Institut, Villigen                              |

## **Auteurs de contributions supplémentaires**

|                    |  |
|--------------------|--|
| Wilfried Haerberli | Geographisches Institut, Université de Zurich                      |
| Hans Hurni         | Geographisches Institut, Université de Berne                       |
| Eberhard Jochem    | Center for Energy Policy and Economics, EPF Zurich                 |
| Nino Künzli        | Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Université de Bâle      |
| Hansruedi Müller   | Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Université de Berne |
| Urs Neu            | ProClim-, Berne  |
| Alexander Wokaun   | Paul Scherrer Institut, Villigen                                   |

## **Groupe d'accompagnement OcCC**

|                     |  |
|---------------------|--|
| Gabi Hildesheimer   | Vereinigung für ökologisch bewusste Unternehmensführung, Zurich            |
| Ruth Kaufmann-Hayoz | Interfakultäre Koordinationsstelle für Allg. Ökologie, Université de Berne |
| Hansruedi Müller    | Forschungsinstitut für Freizeit und Tourismus, Université de Berne         |

## **Direction du projet et rédaction**

|                |                 |
|----------------|-----------------|
| Roland Hohmann | ProClim-, Berne |
|----------------|-----------------|

## **Collaboration rédactionnelle**

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Bettina Büchler | ProClim-, Berne |
| Theres Grau     | ProClim-, Berne |
| Sonja Trappe    | ProClim-, Berne |

## **Layout**

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Roland Hohmann  | Proclim-, Berne |
| Gabriele Müller | ProClim-, Berne |

## **Traduction française**

Jean-Jacques Dätwyler, Sciencepress, Wabernstrasse 34, 3007 Berne

## **Révision**

Jean-Claude Baltzinger, Pomi-Verdan, 1267 Vich

Ce rapport a été accepté par l'OcCC le 10 janvier 2002.

---

# Table des matières

---

|  |    |
|--|----|
| Editorial  | 4  |
| Préface  | 5  |
| Résumé   | 7  |
| 1. Description des changements climatiques   | 9  |
| 1.1. Observation des changements climatiques   | 9  |
| 1.2. Changement du bilan radiatif de la Terre  | 13 |
| 1.3. Cause des changements climatiques de ces 50 dernières années                    | 14 |
| 1.4. Estimation de changements futurs jusqu'en 2100                                  | 15 |
| 1.5. Scénarios de stabilisation et leurs conséquences                                | 19 |
| 2. Effets du changement climatique   | 21 |
| 2.1. Effets des changements climatiques sur le cycle de l'eau et l'économie des eaux | 21 |
| 2.2. Effets des changements climatiques sur les écosystèmes                          | 22 |
| 2.3. Changement du potentiel des puits de CO <sub>2</sub>                            | 25 |
| 2.4. La santé  | 27 |
| 2.5. Secteurs des assurances et des finances   | 29 |
| 2.6. Zones d'habitation, consommation d'énergie et tourisme                          | 31 |
| 3. Stratégies d'atténuation des changements climatiques                              | 33 |
| 3.1. Potentiel technique de réduction des émissions                                  | 33 |
| 3.2. Réduction de la concentration de CO <sub>2</sub> au moyen de puits de carbone   | 34 |
| 3.3. Obstacles et imperfections du marché  | 36 |
| 3.4. Instruments et mesures  | 37 |
| 3.5. Coûts de l'atténuation des changements climatiques                              | 39 |
| Bibliographie  | 42 |
| Glossaire  | 43 |

L'image satellite de l'arc alpin présente encore de vastes zones blanches. Les glaciers des Alpes, qui ont pour notre pays une valeur inestimable, sont clairement reconnaissables. Pour combien de temps encore?

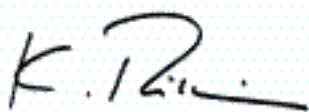
Le volumineux rapport scientifique du GIEC sur le climat, élaboré et expertisé par des centaines de chercheuses et de chercheurs, met en évidence les tendances prévisibles du climat et leurs conséquences. La réalité d'un réchauffement de l'atmosphère a été maintes fois mise en doute. Aujourd'hui, les faits scientifiques parlent un langage clair: l'effet de serre change notre environnement.

Le présent rapport résume les données significatives pour la Suisse du rapport du GIEC. De nombreuses conséquences des changements climatiques sont évidentes. L'élévation des températures moyennes fait fondre la glace. En Suisse depuis des années, la plupart des glaciers reculent. Quelles conséquences le spectre du manque de neige aura-t-il pour les sports d'hiver? Mais des températures plus hautes entraînent aussi le recul du permafrost. Une instabilité plus grande des sols, des glissements de terrain et des coulées de boue sont à craindre.

Il faudra compter sous nos latitudes avec davantage de précipitations, des intempéries plus fréquentes et plus d'inondations, qui s'accompagneront de dommages matériels plus importants et de davantage de souffrance humaine. Un climat plus chaud changera la couverture de végétation et la composition des espèces constitutives de nos forêts. Les forêts de feuillus trouveront de meilleures conditions de développement face aux forêts de résineux. Certaines plantes pousseront plus vite. Qu'est-ce que cela signifie pour notre écosystème? Quelles en seront les conséquences pour notre agriculture?

La politique est mise au défi. Au 19<sup>e</sup> siècle, la Suisse fut confrontée à une accumulation de catastrophes naturelles – inondations, éboulements, glissements de terrain et avalanches. Ces catastrophes obligèrent nos ancêtres à protéger sévèrement la forêt – c'était il y a 125 ans. La première loi sur la forêt vit le jour. «La Suisse a entendu la voix de la forêt, pris ses avertissements au sérieux et donné le coup d'envoi à une protection de l'environnement moderne. Aujourd'hui, nous ne voulons pas attendre que les catastrophes se soient produites, mais agir avec prévoyance en matière de politique du climat», écrit Moritz Leuenberger, président de la Confédération. Révolutionnaire pour l'époque, la loi sur la police des forêts, qui remonte à 125 ans, reposait sur le principe du développement durable. Elle n'autorisait pas à utiliser plus de bois que la quantité produite par la croissance des arbres. La surface de forêt devait rester constante. La loi sur la police des forêts fut en 1876 – et est encore – exemplaire au niveau international.

C'est pourquoi j'attends de notre gouvernement et de notre parlement qu'ils soient prévoyants et tirent les conséquences qui s'imposent des résultats du rapport du GIEC. La Suisse doit faire tout ce qui est en son pouvoir pour éliminer les causes du problème planétaire du changement climatique. Il faut qu'elle participe activement à la mise en œuvre du Protocole de Kyoto partout dans le monde. Comme nos ancêtres, qui se sont montrés clairvoyants en rédigeant une loi sur la forêt exemplaire. Mais il faut aussi que chacun d'entre nous prenne toutes les dispositions possibles pour modérer son usage des combustibles et carburants fossiles. De nombreuses propositions réalistes existent. Mettons-les en œuvre.



Dr. Kathy Ricklin  
Conseillère nationale, Présidente de l'OcCC

---

## Préface

---

Le troisième rapport sur l'état des connaissances (TAR) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, en anglais IPCC) a été publié en 2001. Plus de 2500 spécialistes ont collaboré au TAR. Sur plus de 3000 pages, le rapport, qui a été soumis à une expertise approfondie, fait le point des connaissances actuelles. Il se compose des 3 volumes des groupes de travail I, II et III, ainsi que d'un rapport de synthèse (accessibles sur le web à l'adresse [www.ipcc.ch/pub/tar](http://www.ipcc.ch/pub/tar)):

- Le rapport du groupe de travail I (*Changements climatiques 2001: la base scientifique*) porte sur le climat, les causes des changements climatiques, les analyses du climat du passé, évalue les changements climatiques futurs et identifie et quantifie les influences humaines ayant affecté le climat de ces 50 dernières années.
- Le rapport du groupe de travail II (*Changements climatiques 2001: impacts, adaptation et fragilité*) porte sur la fragilité, la faculté d'adaptation et la vulnérabilité de systèmes naturels et socio-économiques face aux changements climatiques, ainsi que sur les conséquences possibles et les possibilités d'adaptation au niveau régional et global.
- Le rapport du groupe de travail III (*Changements climatiques 2001: mesures d'atténuation*) porte sur les options technologiques et biologiques permettant d'atténuer le changement climatique, sur les coûts et bénéfices additionnels de ces mesures, sur les obstacles à leur mise en oeuvre, ainsi que sur les démarches, mesures et instruments politiques permettant de surmonter ces obstacles.
- Le rapport de synthèse (*Changements climatiques: rapport de synthèse*) répond à des questions d'ordre politique, soulevées en rapport avec la convention cadre sur le changement climatique.

Le GIEC a été fondé en 1988 par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) et le Programme des Nations unies pour l'environnement (PNUE). Depuis 1990, le GIEC a élaboré toute une série de rapports sur l'état des connaissances, de rapports spéciaux, de documents techniques et autres produits. Ils sont souvent utilisés comme ouvrages de référence par des décideurs politiques, des chercheurs et d'autres experts.

L'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) s'est fixé pour tâche de présenter, en un langage largement accessible, les éléments les plus importants pour la Suisse des rapports des groupes de travail I, II et III. 21 spécialistes ont été chargés de lire certains des chapitres et d'en résumer les données significatives pour la Suisse. Il leur a été demandé de s'en tenir au contenu et d'ignorer les résultats de nouvelles études ou de leurs propres travaux de recherche qui n'auraient pas été pris en considération dans le TAR. Leur marge d'interprétation se limitait au choix des données et au poids attribué à ces dernières. Six spécialistes indépendants ont expertisé et révisé le résumé. Pour mettre plus nettement en évidence en quoi la Suisse est concernée, le rapport est complété par sept textes d'experts sur des thèmes choisis (sur fond jaune). Ces textes contiennent aussi des informations qui ne figurent pas dans le TAR. Le rapport a été accepté par l'OcCC le 10 janvier 2002.

En publiant ce résumé, l'OcCC aimerait rendre le contenu du TAR accessible à un plus large éventail de personnes intéressées. Comme autre prestation, les résumés réalisés par les trois groupes de travail à l'attention des décideurs politiques et le rapport de synthèse ont été traduits par ProClim- et l'OcCC en collaboration avec des organisations de recherche allemandes et autrichiennes. Ces rapports en français et en allemand peuvent être obtenus auprès de ProClim-.

---

## Résumé

---

Le troisième rapport sur l'état des connaissances (TAR) du GIEC est disponible. Un groupe de travail de l'OcCC a résumé les principaux résultats du TAR qui concernent la Suisse:

### **Les observations mettent en évidence un réchauffement global de la Terre et d'autres changements climatiques.**

Les années 1990 furent probablement la décennie la plus chaude du siècle et 1998 l'année la plus chaude des mille dernières années. Au cours du 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations ont augmenté sur les continents aux latitudes moyennes à hautes de l'hémisphère Nord. La couverture de neige et de glace a diminué et le niveau de la mer est monté.

L'augmentation de température des 50 dernières années est probablement attribuable en très grande partie aux activités humaines. Les concentrations de dioxyde de carbone, méthane et protoxyde d'azote – des gaz à effet de serre – ont fortement augmenté depuis le début de l'ère industrielle. Les modèles de climat ne parviennent à simuler le réchauffement observé pendant les 50 dernières années que s'ils tiennent compte de l'augmentation des gaz à effet de serre.

La composition de l'atmosphère continuera de changer sous l'influence humaine. D'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle, la température globale moyenne se sera élevée de 1.4 à 5.8°C. Très probablement, la température augmentera davantage sur les terres émergées et dans l'arc alpin qu'en moyenne globale. Les zones enneigées et les glaciers alpins continueront de fondre tandis que le niveau de la mer poursuivra sa montée.

Les changements climatiques causés par l'activité humaine s'étendront sur plusieurs siècles. Si l'on veut stabiliser la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub>, il faudra ramener les émissions globales au-dessous de leurs niveaux actuels. Along terme, les émissions devraient tomber à une fraction des valeurs actuelles.

### **Les changements climatiques ont un impact sur la nature et la société.**

Dans les montagnes, les changements climatiques auront pour conséquence que les glaciers et le permafrost continueront de reculer. Dans les Alpes, les précipitations sous forme de neige diminueront; en certains endroits, elles feront même entièrement défaut. Dans de nombreuses régions, la fréquence et l'ampleur des crues augmenteront, surtout en hiver.

L'impact des changements climatiques sur les écosystèmes diffère d'une région à l'autre et se combine avec d'autres effets environnementaux. La diversité biologique des écosystèmes naturels va se modifier. L'accélération de la croissance de la végétation, découlant de concentrations de CO<sub>2</sub> plus élevées et de températures plus chaudes, est limitée par d'autres facteurs. Au début, on pourra compter avec une augmentation de la fonction de puits des écosystèmes ruraux sous l'action du changement climatique. Mais si le climat continue de changer, ces écosystèmes pourraient se transformer en sources de carbone.

Dans les zones tempérées, des étés plus chauds et des vagues de chaleur plus fréquentes entraîneront une augmentation du nombre des décès. Les effets de la pollution de l'air sur la santé seront probablement accentués par les changements climatiques. La propagation et la fréquence des maladies infectieuses changeront.

Les dommages économiques et les dégâts assurés des catastrophes naturelles ayant des causes météorologiques ont beaucoup augmenté. Dans le secteur de la finance, ce sont les assurances qui sont directement touchées. Une corrélation entre l'augmentation des dommages et les changements climatiques n'est pas encore clairement établie.

### **Il est possible de réduire les émissions de gaz à effet de serre par des mesures techniques et d'atténuer l'accroissement des concentrations de gaz à effet de serre par des moyens biologiques.**

L'insuffisance des mesures économiques et politiques rend souvent plus difficile la mise en œuvre des mesures techniques de réduction des gaz à effet de serre. Diverses entraves, ainsi que les imperfections du marché font obstacle à une utilisation plus grande des technologies et procédés innovants.

De nombreuses options politiques se présentent pour réduire les gaz à effet de serre. Une combinaison de mesures permet de mener la politique du climat au succès. Les mesures et stratégies politiques devraient être coordonnées et harmonisées au niveau international.

Les coûts des mesures d'atténuation du changement climatique jouent un rôle central. Les mécanismes flexibles du Protocole de Kyoto permettent d'abaisser ces coûts de façon décisive. Il n'y a pas de rapport entre le niveau d'une taxe sur le CO<sub>2</sub> et le développement du PIB.

# 1. Description des changements climatiques

Ce premier chapitre résume les éléments les plus importants pour la Suisse des données fournies par le groupe de travail I dans le 3<sup>e</sup> Rapport du GIEC sur l'état des connaissances (TAR). Sur près de 900 pages, le rapport présente les connaissances acquises ces 5 dernières années par la recherche sur les changements climatiques.

Les changements climatiques sont un processus global. Ce résumé les décrit donc aussi de façon globale. Il porte sur les changements climatiques observés jusqu'ici, les changements du bilan radiatif de la Terre, les causes des changements climatiques observés, l'évaluation des changements climatiques futurs et les scénarios visant à stabiliser les gaz à effet de serre.

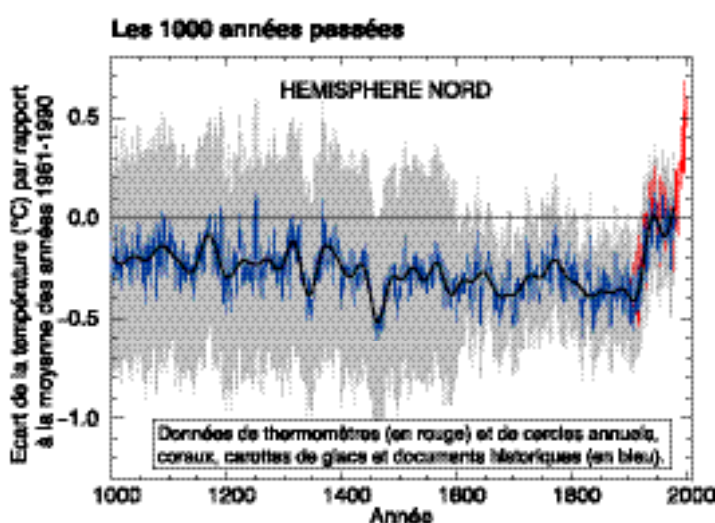
Dans ce résumé, nous utiliserons les appréciations du groupe de travail du GIEC pour exprimer le degré d'incertitude: *pratiquement sûr* (>99% de probabilité que l'affirmation est pertinente), *très probable* (90-99%), *probable* (66-90%), *probabilité moyenne* (33-66%), *improbable* (10-33%), *très improbable* (1-10%), *extrêmement improbable* (<1%).

## 1.1. Observation des changements climatiques

**Les observations font apparaître globalement un réchauffement de la planète. La température moyenne à la surface de l'hémisphère Nord a augmenté probablement davantage au cours du 20<sup>e</sup> siècle que pendant les périodes comparables des derniers 1000 ans. Les années 90 furent probablement la décennie la plus chaude, et 1998 l'année la plus chaude des derniers 1000 ans. Parallèlement, la couverture de neige et de glace a diminué au 20<sup>e</sup> siècle, les pluies ont très probablement augmenté et le niveau de la mer est monté.**

### La planète se réchauffe:

Les estimations des fluctuations de température au cours des 1000 dernières années se sont nettement améliorées depuis le 2<sup>me</sup> rapport d'évaluation (SAR) en 1995. Elles permettent de situer l'augmentation de température du 20<sup>e</sup> siècle dans une perspec-

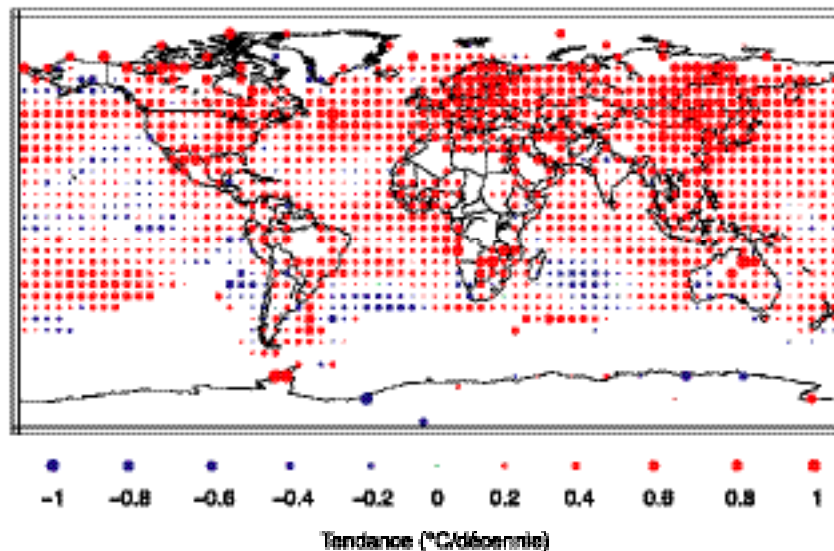


**Figure 1:** Des augmentations de température telles qu'observées depuis 1910 ne se sont jamais présentées avec une durée et une ampleur comparables au cours des derniers 1000 ans. Mesures directes en rouge, données reconstruites en bleu, courbe de la moyenne (moyenne mobile sur 50 ans) en noir. La marge d'incertitude (en gris) croît avec l'âge des données.

tive à plus long terme (figure 1). Du 11<sup>e</sup> au 14<sup>e</sup> siècle, les températures de l'hémisphère Nord furent plus hautes que pendant la période du 15<sup>e</sup> au 19<sup>e</sup> siècle (petit âge glaciaire). Il n'existe toutefois aucun indice selon lequel il s'agirait de fluctuations synchrones à l'échelle planétaire. Le réchauffement global persistant au cours du 20<sup>e</sup> siècle ne peut pas être interprété simplement comme étant la phase terminale du petit âge glaciaire, car un réchauffement de cette durée et de cette ampleur ne s'est jamais produit au cours des 1000 dernières années.

Le réchauffement observé au cours du 20<sup>e</sup> siècle s'est déroulé en deux phases, de 1910 à 1945 et à partir de 1975. Dans l'hémisphère Nord, le réchauffement fut de  $0.17 \pm 0.04^\circ\text{C}/\text{décennie}$  pendant la première phase, et de  $0.26 \pm 0.09^\circ\text{C}/\text{décennie}$  à partir de 1975. Le réchauffement fut plus marqué dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud (figure 2). Les températures nocturnes ont augmenté davantage que les températures diurnes, ce qui a provoqué un allongement de la période annuelle sans gel.

**Tendances des températures de 1975 à 2000**



**Figure 2:** L'hémisphère Nord s'est réchauffé davantage que l'hémisphère Sud. Tendances de la température à la surface du globe, en °C par décennie, calculées à partir des températures annuelles moyennes des années 1976 à 2000. Les tendances sont indiquées par la taille des points (réchauffement en rouge, refroidissement en bleu).

### Moins de neige et de glace:

Depuis 1960, la surface de la couverture neigeuse dans l'hémisphère Nord a très probablement reculé d'environ 10%. Depuis le milieu du 19<sup>e</sup> siècle, partout dans le monde les glaciers reculent dans les régions de montagnes. Bien que les températures n'aient que faiblement augmenté sous les tropiques depuis 1980, on y relève un recul rapide des glaciers. Depuis 1950, la surface de la banquise, au printemps et en été, a diminué de 10 à 15% dans l'océan Arctique, son épaisseur s'est même réduite de 40% pendant cette même période. Dans l'Antarctique par contre, on a constaté une légère augmentation de l'étendue de la banquise.

### Davantage de précipitations:

Pendant le 20<sup>e</sup> siècle, les précipitations sur les zones continentales aux latitudes moyennes à élevées de l'hémisphère Nord ont très probablement augmenté de quelque 0.5 à 1% par décennie. Des mesures et des observations par satellites indi-

quent que la teneur en vapeur d'eau de l'atmosphère a probablement augmenté de plusieurs pour cent par décennie depuis les années 70. L'augmentation de la couverture nuageuse, probablement de 2% au cours du 20<sup>e</sup> siècle aux latitudes moyennes et hautes, est en rapport avec la diminution observée des fluctuations journalières des températures.

Dans les régions où les précipitations ont globalement augmenté, il y a eu très probablement aussi un accroissement du nombre des précipitations fortes et extrêmes. Par contre, il n'existe aucun indice d'une augmentation de la fréquence et de la violence des tempêtes tropicales et subtropicales.

### Evolution de la température en Suisse au cours du 20<sup>e</sup> siècle

L'élévation de la température en Suisse durant le 20<sup>e</sup> siècle est nettement plus forte qu'en moyenne globale. Cette élévation résulte, comme pour la moyenne globale, principalement de la forte augmentation enregistrée pendant les trois dernières décennies.

Dans les stations suisses, on ne constate pas de différence significative de l'évolution en fonction de l'altitude. Par contre, des différences régionales sont perceptibles entre la Suisse occidentale et orientale et entre le Nord et le Sud des Alpes. Le 20<sup>e</sup> siècle présente les tendances linéaires suivantes<sup>1</sup>:

- Suisse alémanique<sup>2</sup> : 1.3 °C (1.2 – 1.5)
- Suisse occidentale<sup>3</sup> : 1.6 °C (1.5 – 1.7)
- Sud des Alpes<sup>4</sup> : 1.0 °C

La moyenne globale correspondante est de 0.6°C.

Pendant les 30 dernières années, l'augmentation de température d'environ 0.4 – 0.6°C par décennie enregistrée en Suisse est nettement plus grande qu'en moyenne globale (0.1 – 0.2°C par décennie). Les tendances linéaires de 1971 à 2000 sont un peu plus faibles aux altitudes moyennes et au sud des Alpes (environ 0.5°C/décennie) que sur le Plateau (environ 0.6°C/décennie).

Il y a de nombreuses raisons possibles à cette augmentation de température nettement plus forte en Suisse qu'en moyenne globale, et il est probable que plusieurs facteurs interviennent. Par exemple:

- La température au-dessus des continents augmente en général plus fortement que la moyenne globale.
- La diminution du manteau neigeux dans les régions de montagnes entraîne un réchauffement supplémentaire (rétroaction positive) en raison du changement d'albédo (c.-à-d. de l'absorption du rayonnement solaire).
- Des fluctuations internes du climat, d'une périodicité de quelques décennies (p. ex. l'oscillation de l'Atlantique Nord), peuvent se superposer et conduire alors à un renforcement (ou un affaiblissement) du réchauffement. De telles fluctuations naturelles pourraient toutefois changer durablement, également sous l'action du réchauffement global.

Il est difficile d'estimer quels facteurs contribuent au renforcement du réchauffement et dans quelle mesure. Des analyses statistiques, qui ne sont pas encore disponibles actuellement, permettraient éventuellement de déterminer la part qui ne peut être attribuée à des fluctuations relevant du hasard. A noter que des modélisations physiques régionales font presque toujours état également d'un réchauffement plus marqué de l'arc alpin. Pour l'heure, rien n'indique un affaiblissement de la tendance des 30 dernières années.

*Dr. Urs Neu*

<sup>1</sup> Le calcul des tendances se réfère aux séries de mesures homogénéisées (moyenne annuelle, 12 stations) de la banque de données mensuelles de MétéoSuisse.

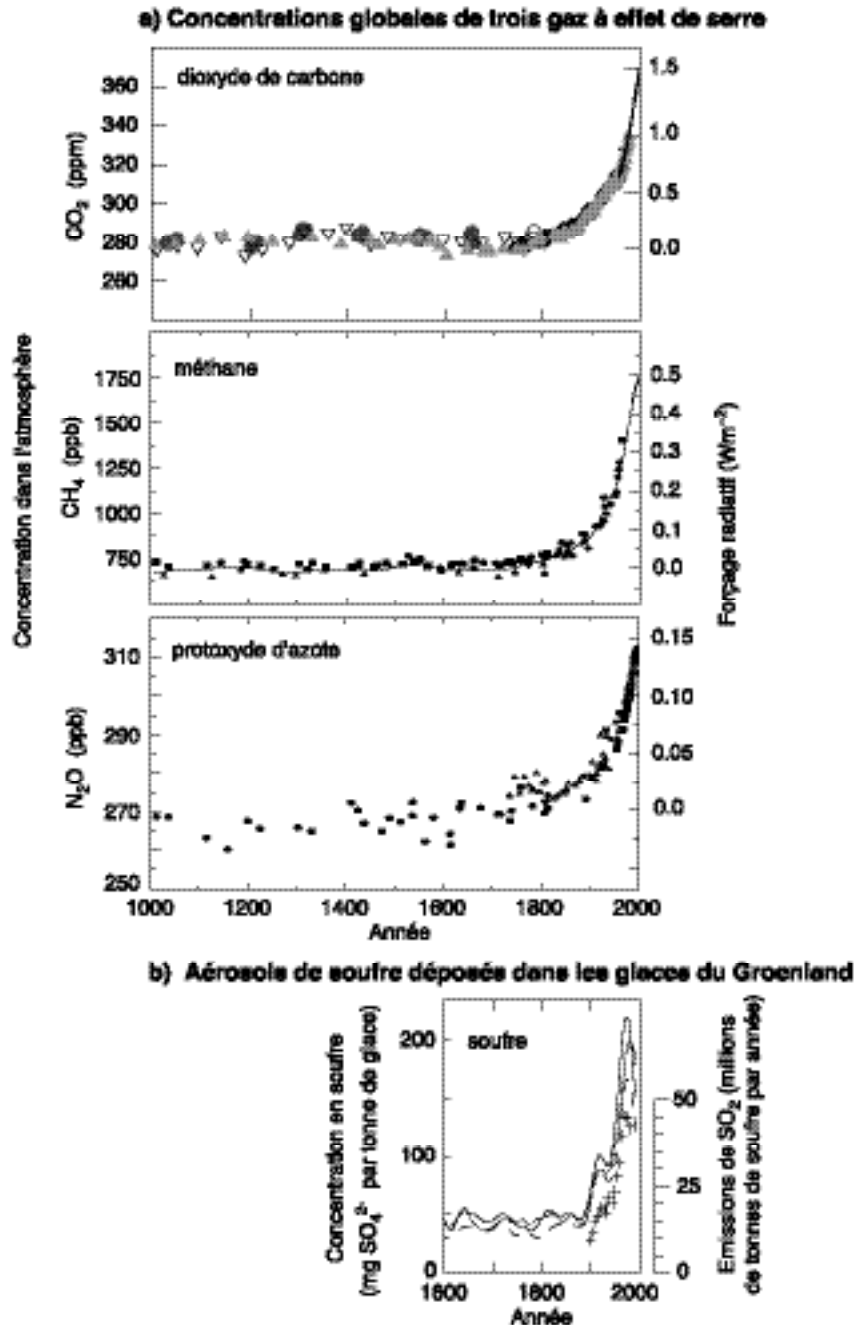
<sup>2</sup> Säntis, Davos, Zurich, Engelberg, Berne, Bâle, Chaumont

<sup>3</sup> Châteaux d'Oex, Sion, Genève

<sup>4</sup> Lugano, Sils-Maria

### Le niveau de la mer monte:

On déduit des mesures des marées que le niveau de la mer s'est élevé de 1 à 2 mm par an pendant les 100 dernières années. L'élévation moyenne a été plus importante pendant le 20<sup>e</sup> que pendant le 19<sup>e</sup> siècle.



**Figure 3:** (a) Depuis le début de l'ère industrielle (1750), les concentrations de gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), de méthane ( $\text{CH}_4$ ) et de protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ), trois gaz à effet de serre, augmentent de façon notable dans l'atmosphère. Les symboles désignent les concentrations au cours du dernier millénaire, mesurées dans des bulles d'air incluses dans des carottes de glace de différentes origines; la courbe (dioxyde de carbone) ou les portions de courbe (méthane) représentent les mesures directes effectuées ces dernières décennies. (b) La concentration en soufre dans les glaces du Groenland (courbes) est une indication sur la concentration régionale d'aérosols de soufre dans l'atmosphère. Les émissions de soufre mesurées depuis 1900 (+) augmentent de manière comparable.

## 1.2. Changement du bilan radiatif de la Terre

**Les activités humaines associées à l'émission d'aérosols et de gaz à effet de serre modifient l'atmosphère et par conséquent le bilan radiatif de la Terre (somme du rayonnement qui arrive sur la Terre et de celui qui en repart). On s'attend à ce que l'effet de ce changement sur le climat dure plusieurs siècles. Les facteurs naturels (rayonnement solaire incident et aérosols d'origine volcanique) ont peu contribué au changement du bilan radiatif pendant les 100 dernières années.**

La présence des gaz à effet de serre dans l'atmosphère est importante pour la vie sur la Terre. Ils modifient le bilan radiatif de la planète, car ils laissent passer le rayonnement solaire de courte longueur d'onde (rayonnement UV), mais retiennent en partie le rayonnement de grande longueur d'onde émis par la Terre (rayonnement infrarouge). Ainsi la Terre se réchauffe et devient habitable. Cet effet naturel est renforcé par les gaz à effet de serre produits par l'homme.

### Davantage de gaz à effet de serre dans l'atmosphère:

Les gaz à effet de serre les plus importants à part la vapeur d'eau sont le gaz carbonique ( $\text{CO}_2$ ), le méthane ( $\text{CH}_4$ ) et le protoxyde d'azote ( $\text{N}_2\text{O}$ ). Leurs concentrations ont fortement augmenté pendant les 200 dernières années (figure 3a). Les concentrations de  $\text{CO}_2$  et de  $\text{CH}_4$  ont augmenté respectivement de 31% et de 151% depuis 1750 et sont plus élevées aujourd'hui qu'elles ne l'ont jamais été pendant les dernières 420'000 années. Une augmentation aussi rapide du  $\text{CO}_2$  n'a jamais été observée depuis au moins 20'000 ans.

Environ 75% des émissions de  $\text{CO}_2$  pendant les 20 dernières années sont à mettre sur le compte de la combustion de carburants fossiles (pétrole, charbon, méthane) et 25% environ proviennent du changement d'utilisation des sols, avant tout par le déboisement. Les émissions provenant de changements d'utilisation du sol furent plus que compensées pendant les 20 dernières années par une absorption accrue de carbone par la végétation des tropiques et des latitudes moyennes. Il est possible que ce puits de  $\text{CO}_2$  soit dû à la croissance des plantes grâce à la concentration plus élevée du  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et à un apport d'azote plus élevé, de même qu'au retour des forêts dans les régions en friche des latitudes moyennes.

L'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre résultant des activités humaines accroît le bilan radiatif de la troposphère d'environ  $+2.43 \text{ Wm}^{-2}$ . Le «plus» indique un réchauffement de la planète. Aujourd'hui, le  $\text{CO}_2$  contribue à raison de  $1.46 \text{ Wm}^{-2}$  environ à cet effet de serre supplémentaire, le  $\text{CH}_4$  à raison de  $0.48 \text{ Wm}^{-2}$  environ et le  $\text{N}_2\text{O}$  de  $0.15 \text{ Wm}^{-2}$  environ. D'autres gaz à effet de serre sont les hydrocarbures halogénés ( $0.34 \text{ Wm}^{-2}$ ) et l'ozone troposphérique ( $0.35 \text{ Wm}^{-2}$ ).

### Influence incertaine des aérosols:

Les aérosols, particules minuscules en suspension dans l'air, qui proviennent des processus de combustion (soufre, suie et particules organiques), contribuent généralement à un refroidissement en diffusant la lumière solaire incidente. Des mesures effectuées dans les glaces du Groenland indiquent que les concentrations en aérosols ont fortement augmenté dans l'atmosphère depuis 1900 et ne diminuent que depuis la fin du 20<sup>e</sup> siècle, grâce aux progrès technologiques (figure 3b). Leur influence sur le bilan radiatif reste cependant entachée d'incertitudes ( $\pm 2 \text{ Wm}^{-2}$ ).

### Faible influence du soleil et des volcans:

Les deux derniers cycles solaires (de 11 ans) ont provoqué, selon des mesures par satellite, des fluctuations du bilan radiatif de l'ordre de  $0.2 \text{ Wm}^{-2}$ . L'influence de

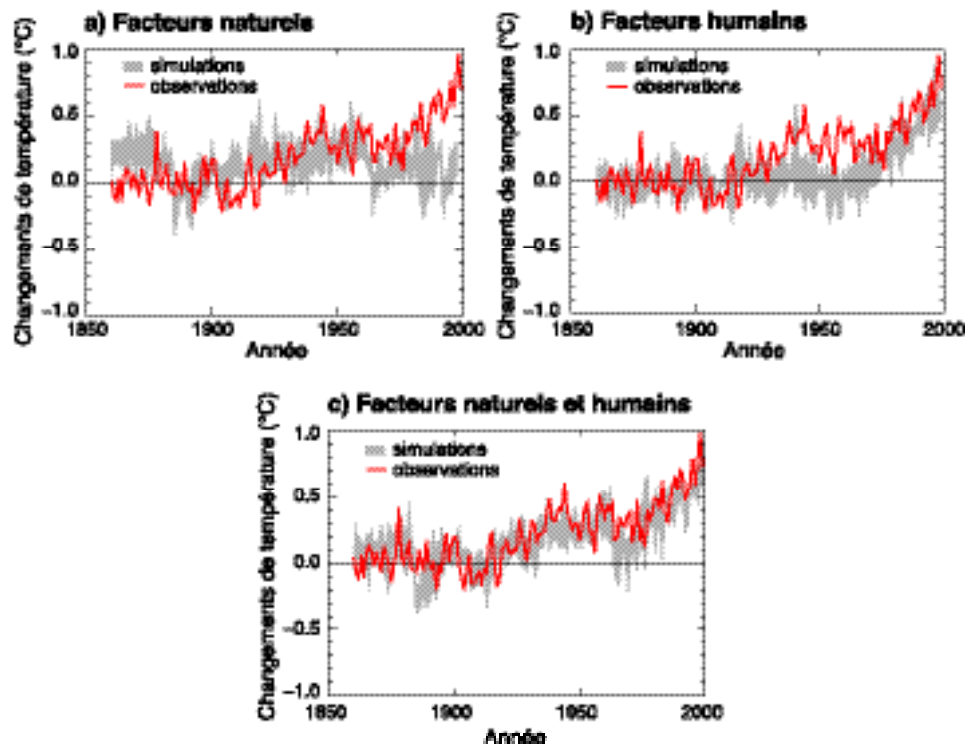
l'activité solaire sur le bilan radiatif depuis 1750 est estimée à  $(0.3 \pm 0.2) \text{ Wm}^{-2}$ . Des fluctuations à de plus grandes échelles de temps pourraient avoir causé des variations encore plus grandes, toutefois les estimations à ce sujet ne sont pas suffisamment vérifiées. Elles sont relativement faibles, face à l'augmentation du bilan radiatif de  $2.43 \text{ Wm}^{-2}$  résultant de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.

Les petites fluctuations de l'activité solaire, ajoutées à une activité volcanique plus intense entre 1960 et 1991, ont eu un effet réfrigérant pendant ces 20, voire probablement ces 40 dernières années.

### 1.3. Cause des changements climatiques de ces 50 dernières années

**De nouvelles données montrent clairement que l'augmentation de température des 50 dernières années est probablement attribuable pour une grande part aux activités humaines. Des simulations utilisant des modèles de climat qui ne prennent pas en compte l'augmentation des gaz à effet de serre ne peuvent pas expliquer le réchauffement de la deuxième moitié du 20<sup>e</sup> siècle.**

Les modèles actuels de climat assistés par ordinateur ne peuvent simuler quantitativement le réchauffement observé au cours des 50 dernières années qu'en prenant en compte l'augmentation des gaz à effet de serre (figure 4). Jusque vers 1950, les fluctuations naturelles du bilan radiatif, associées aux cycles solaires et aux éruptions volcaniques, ont eu une influence substantielle sur la température globale



**Figure 4:** Le réchauffement des 50 dernières années ne peut pas être simulé quantitativement sans faire intervenir les gaz à effet de serre et les aérosols. Changement de la température globale moyenne entre 1850 et 2000, au moyen de simulations basées sur quatre modèles différents (bande grisée), est comparé aux températures mesurées (courbe rouge). Trois sortes d'influences sur le bilan radiatif ont été étudiées: (a) des facteurs naturels (cycle solaire et activité volcanique); (b) des facteurs humains (augmentation des gaz à effet de serre et des aérosols); (c) des facteurs naturels et humains.

moyenne. Mais l'augmentation de température après 1950 n'est pas explicable par les seuls facteurs naturels. Plusieurs simulations, partant de conditions initiales légèrement différentes, confirment ce résultat.

Grâce à de nouveaux modèles et méthodes statistiques, les changements observés au cours des derniers siècles peuvent être attribués à différentes causes. La plupart des études indiquent que le net réchauffement des 50 dernières années peut être attribué à l'augmentation des gaz à effet de serre. Les causes du changement du bilan radiatif, prises en compte dans ces études, suffisent à expliquer les changements de température observés. Cela n'exclut pas que d'autres effets puissent avoir aussi contribué au réchauffement observé. Des incertitudes subsistent quant à l'estimation de la variabilité naturelle, les diverses influences des aérosols et la reconstitution de l'intensité du rayonnement solaire incident et de l'activité volcanique. En dépit de ces incertitudes, l'effet des gaz à effet de serre d'origine humaine au cours des 50 dernières années est bien visible.

## 1.4. Estimation de changements futurs jusqu'en 2100

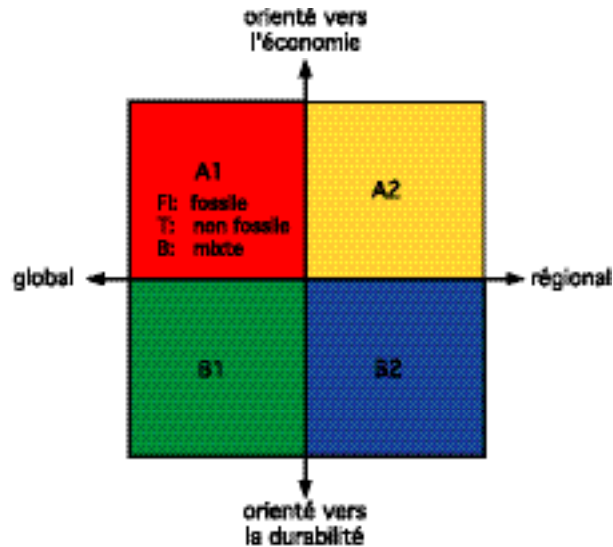
**Les activités humaines continueront à affecter la composition de l'atmosphère, et la température globale moyenne augmentera dans tous les scénarios ne prévoyant pas de mesures en matière de politique du climat. Aux latitudes Nord, les précipitations augmenteront probablement.**

### Différents scénarios:

Les 40 scénarios élaborés pour le rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission (*Special Report on Emission Scenarios*, SRES) décrivent les évolutions possibles des émissions des principaux gaz à effet de serre et aérosols entre 1990 et 2100. Ces scénarios constituent la base des modèles de prévision du climat futur. Ils reposent sur des hypothèses différentes, mais plausibles, relatives au développement technologique, à l'évolution démographique, à la croissance économique et à la globalisation. Elles n'incluent toutefois aucune mesure politique explicite visant à atténuer les changements climatiques.

Les scénarios se subdivisent en quatre familles A1, A2, B1 et B2, qui correspondent chacune à un des secteurs du carré de la figure 5. A1 et A2 sont orientées plutôt vers l'économie, alors que B1 et B2 visent le développement durable. A1 et B1 sont plutôt globales, au contraire de A2 et B2 qui tablent sur les différences régionales. Au sein d'une famille, les scénarios divergents sont classés par groupes, comme les groupes FI, T et B dans la famille A1. Les six scénarios A1FI, A1T, A1B, A2, B1 et B2 sont des *scénarios illustratifs* qui représentent, en proposant un développement possible de l'humanité, les différents scénarios du secteur correspondant:

- A1, global et orienté vers l'économie: croissance économique rapide, pic démographique vers 2050, introduction rapide de technologies nouvelles et efficaces, réduction des disparités économiques globales. Les trois groupes de scénarios, qui décrivent chacun un développement technologique de la forme d'énergie considérée, sont A1FI (sources d'énergie fossile), A1T (sources d'énergie non fossiles) et A1B (combinaison équilibrée de différentes énergies).
- A2, régional et orienté vers l'économie: développement inégal du monde, démographie galopante, économies à développement lent, différentes selon les régions et peu interconnectées.
- B1, global et orienté vers le développement durable: mutation rapide vers une société des services et de l'information, pic démographique vers 2050, introduction rapide de technologies nouvelles et efficaces, nivellement des disparités entre continents, durabilité à l'échelle planétaire.



**Figure 5:** Les quatre familles A1, A2, B1 et B2 des scénarios du GIEC relatifs aux émissions occupent chacune un des secteurs du carré des scénarios. Un scénario représentatif, dit scénario illustratif, représente les différents scénarios possibles à l'intérieur d'un secteur. La famille A1 est représentée par les trois scénarios FI, T et B, qui recourent à d'autres formes d'énergie et se distinguent très nettement quant à leurs conséquences.

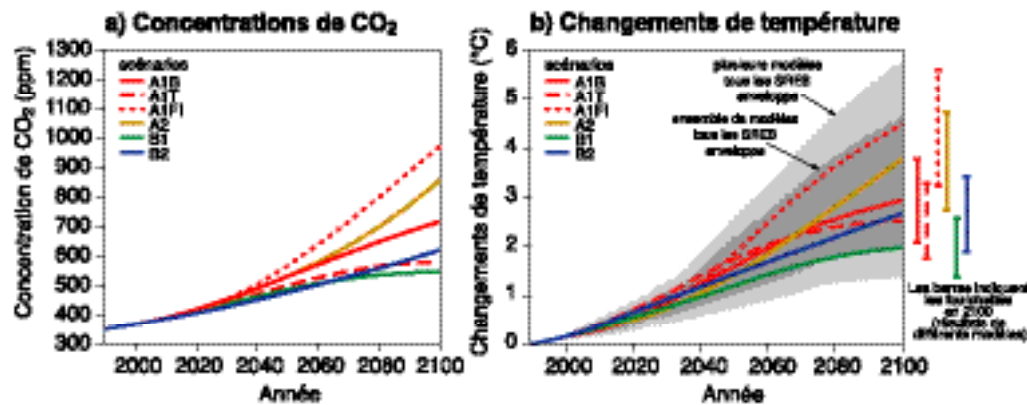
- B2, régional et orienté vers le développement durable: solution régionale des problèmes, croissance démographique lente, croissance économique modérée avec disparités régionales, durabilité à l'échelle régionale.

### Emissions de CO<sub>2</sub> au 21<sup>e</sup> siècle:

Les différents scénarios offrent un large spectre d'évolutions possibles des émissions. Pour les six scénarios illustratifs, les émissions cumulées de dioxyde de carbone jusqu'en 2100 se situent dans une fourchette entre 980 et 2100 gigatonnes de carbone (1GtC = 10<sup>12</sup> kg C = 3.67 10<sup>12</sup> kg CO<sub>2</sub>). A titre de comparaison, la teneur en carbone de l'atmosphère avant l'ère industrielle était de 590 GtC et les ressources fossiles sont estimées à 5000 GtC environ.

### Concentrations de gaz à effet de serre au 21<sup>e</sup> siècle:

L'action combinée de tous les gaz à effet de serre et aérosols conduit dans tous les scénarios SRES à un changement positif du bilan radiatif (réchauffement) de la surface de la Terre et de la basse atmosphère. Les changements des concentrations atmosphériques de gaz à effet de serre et d'aérosols, ainsi que les changements climatiques ont été estimés à l'aide de modèles. Selon les six scénarios illustratifs, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère atteindra 540 à 970 ppm d'ici à 2100, soit une augmentation de 90 à 250% par rapport à la concentration préindustrielle de 280 ppm (figure 6a). L'estimation de l'incertitude de ces valeurs, basée sur notre compréhension actuelle du cycle du carbone, se situe entre -10% et +30%. Il est par contre quasi certain que la cause de l'augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique est avant tout la production de CO<sub>2</sub> due à l'utilisation de combustibles fossiles. Des changements dans l'utilisation des sols, comme mentionnés par exemple aux articles 3.3 et 3.4 du Protocole de Kyoto, peuvent jouer le rôle de puits de carbone et influencer sur la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. De telles mesures permettent de réduire la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère au maximum de 40 à 70 ppm jusqu'en 2100, ce qui représente seulement 10% environ de l'augmentation selon les scénarios illustratifs.



**Figure 6:** (a) Des modélisations mathématiques du cycle global du carbone indiquent que, pour les six scénarios illustratifs SRES, la concentration de CO<sub>2</sub> dans l’atmosphère atteindra d’ici 100 ans entre 540 et 970 ppm. (b) Selon des projections basées sur les scénarios SRES, l’augmentation de la température globale moyenne de 1990 à 2100 se situera entre 1.4 et 5.8°C. Les changements de température de tous les scénarios et de tous les modèles se retrouvent dans la zone gris clair, la moyenne de tous les modèles pour tous les scénarios dans la zone gris foncé.

Les projections pour les concentrations d’autres gaz à effet de serre (méthane, ozone, protoxyde d’azote, composés halogénés) varient sensiblement entre les six scénarios illustratifs. Par exemple, la concentration de méthane diminue de 190 ppb par rapport au niveau actuel de 1760 ppb (scénario B1) ou augmente jusqu’à 1970 ppb (scénario A2). La forte augmentation des émissions de gaz à effet de serre et d’autres polluants atmosphériques dans certains scénarios conduit à une forte diminution de la qualité de l’air découlant d’une augmentation de la concentration de fond de l’ozone près du sol. Grâce à l’utilisation de nouvelles technologies de dépollution de l’air, les émissions globales de dioxyde de soufre et la concentration moyenne des aérosols du soufre passeront, dans tous les scénarios illustratifs, au-dessous des valeurs actuelles d’ici 2100. Il s’ensuit une réduction de l’effet réfrigérant des aérosols du soufre sur la température à la surface du globe.

### Elévation de la température au 21<sup>e</sup> siècle:

La température globale moyenne augmentera de 1.4 à 5.8°C entre 1990 et 2100 (figure 6b). Cette fourchette ressort des scénarios SRES et d’un ensemble de différents modèles du climat. Ce réchauffement est 2 à 10 fois plus élevé que celui enregistré au cours du 20<sup>e</sup> siècle et est très probablement un fait unique depuis la fin de la dernière ère glaciaire, il y a environ 10’000 ans.

Les changements climatiques sont très différents suivant les régions. Il est très probable que la température augmentera davantage sur la terre ferme et dans le massif alpin qu’en moyenne globale. Il est très probable que la fréquence et l’intensité des vagues de chaleur estivales augmentera dans toute l’Europe et que le nombre de jours de gel diminuera.

### Précipitations au 21<sup>e</sup> siècle:

Les précipitations augmenteront probablement sous les latitudes moyennes et hautes de l’hémisphère Nord. Dans la plupart des régions dans lesquelles les précipitations augmenteront, la pluviosité variera très probablement davantage d’une année à l’autre. Pour le massif alpin, les modèles indiquent une tendance à la diminution des précipitations en été et à l’augmentation des précipitations en hiver.

Il est probable que la fréquence des fortes précipitations augmentera en Europe, surtout en hiver. L’information sur d’autres phénomènes météorologiques extrêmes est pour l’heure insuffisante pour estimer des tendances à leur sujet; en effet, la

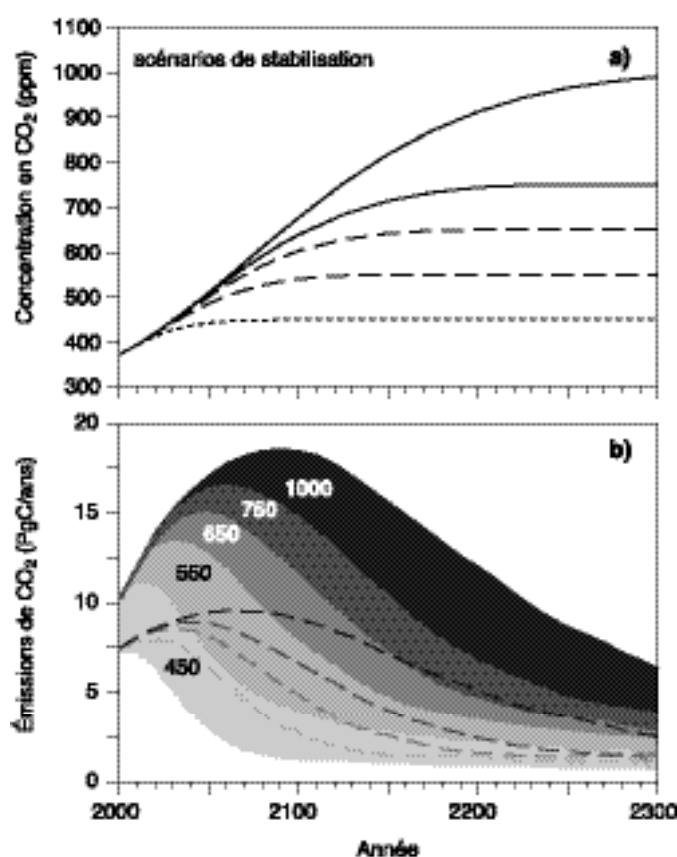
résolution spatiale des modèles globaux du climat n'est pas encore suffisante pour fournir des prévisions fiables. Des phénomènes météorologiques à petite échelle, comme les orages, les tornades et la grêle ne sont par exemple pas simulés par les modèles du climat.

### Couverture de neige et de glace au 21<sup>e</sup> siècle:

Selon les études sur modèles, la couverture de neige et la banquise continueront de diminuer dans l'hémisphère Nord et les glaciers alpins continueront de fondre.

### Élévation du niveau des mers au 21<sup>e</sup> siècle:

De 1990 à 2100, l'élévation du niveau moyen global des mers se situera entre 9 et 88 cm. La cause principale en est la dilatation thermique des océans. Cette fourchette est obtenue à partir des scénarios SRES et d'un ensemble de différents modèles climatiques.



**Figure 7:** Les émissions globales de CO<sub>2</sub> devront être réduites au-dessous des valeurs actuelles pour stabiliser la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. a) Plusieurs scénarios pour une stabilisation des concentrations de CO<sub>2</sub> à moyen ou à long terme (de 50 jusqu'à plus de 300 ans), qui serait possible si les émissions évoluaient selon les domaines correspondants de (b). La fourchette des émissions de chacun des profils (en gris) traduit les incertitudes des connaissances actuelles sur le cycle du carbone. Lorsque les domaines se chevauchent, la limite inférieure de l'incertitude est marquée par une ligne discontinue.

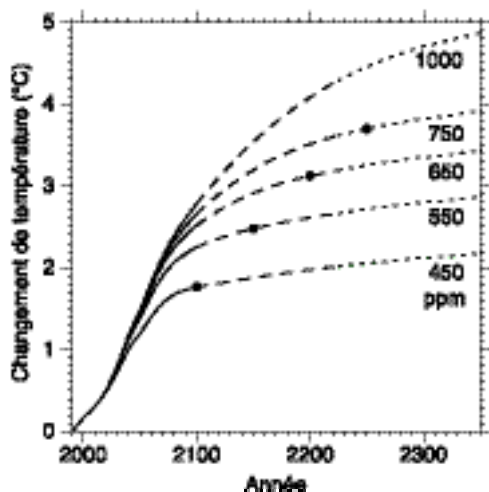
## 1.5. Scénarios de stabilisation et leurs conséquences

**Les changements climatiques engendrés par l'activité humaine dureront plusieurs siècles. Pour limiter les changements du bilan radiatif et du climat, il faut abaisser les émissions de gaz à effet de serre. Une stabilisation de la teneur de l'atmosphère en CO<sub>2</sub> exige une réduction des émissions globales au-dessous des valeurs actuelles.**

### Le CO<sub>2</sub> persiste dans le système climatique:

Les émissions de CO<sub>2</sub> sont la cause d'un changement durable de la composition de l'atmosphère et du climat. Le CO<sub>2</sub> issu de la combustion de combustibles fossiles n'est pratiquement pas dégradé, mais s'accumule dans le système climatique et se répartit entre l'atmosphère, l'océan et la biosphère. C'est ainsi que dans plusieurs siècles, le quart d'une quantité donnée de CO<sub>2</sub> relâchée aujourd'hui se trouvera encore dans l'atmosphère.

Des modèles du cycle du carbone indiquent que la stabilisation de la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère exige une réduction des émissions globales de CO<sub>2</sub> au-dessous des émissions de 1990 (figure 7). A long terme, ces émissions devraient descendre jusqu'à une fraction des valeurs actuelles. Pour tous les scénarios dans lesquels la concentration en CO<sub>2</sub> se stabilise entre 450 et 1000 ppm, et compte tenu des incertitudes des modèles, le réchauffement jusqu'en 2100 est inférieur à 3.5°C (figure 8). On évite ainsi le domaine supérieur des projections fournies par les scénarios SRES pour l'élévation de température (jusqu'à 5.8°C). Plus on stabilise la concentration de CO<sub>2</sub> vers le bas, plus faible est le changement de température. Pourtant, même après la stabilisation des émissions de CO<sub>2</sub>, les températures continueront d'augmenter pendant des siècles, car les océans réagissent très lentement.



**Figure 8:** Dans tous les scénarios de stabilisation du CO<sub>2</sub> selon la figure 7a, l'augmentation de la température moyenne globale à la surface de la Terre jusqu'en 2100 reste inférieure à 3.5°C. Sans stabilisation, l'augmentation de la température pourrait aller jusqu'à 5.8°C. Les points noirs indiquent le moment auquel la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère se stabilise (cf. figure 7a). La température continue de monter aussi après la stabilisation.

**D'autres gaz à effet de serre seront dégradés:**

Le méthane, l'ozone et les aérosols sont rapidement dégradés. Les concentrations d'ozone troposphérique (assujetties aux émissions de CO, NO<sub>x</sub>, hydrocarbures volatils et méthane) et d'aérosols (soufre, suie et particules organiques carbonées) se stabiliseraient en l'espace de quelques jours à quelques semaines et la concentration du méthane en quelques décennies après le «gel» de leurs émissions respectives.

Des gaz à effet de serre tels que le protoxyde d'azote et les composés halogénés se dégradent, mais ont une longue durée de vie. Pour stabiliser leurs concentrations aux niveaux actuels, il faudrait également réduire leurs émissions.

**Effets des changements climatiques sur les glaciers et le permafrost dans les Alpes**

En haute montagne, la glace réagit de façon particulièrement forte aux changements climatiques. Depuis le milieu du siècle passé jusque dans les années 1970, les glaciers alpins ont perdu au total un bon tiers de leur surface et en gros la moitié de leur masse, tandis que la limite de la neige est montée de près de 100 m. On estime qu'au cours des seules 20 dernières années, un quart à un tiers du volume résiduel a disparu.

L'évolution du permafrost, dont la superficie (env. 5% de la surface du pays) représente en Suisse environ deux fois la surface de ce qui reste encore des glaciers, ne peut pas être saisie de manière aussi précise. Selon les sondages les plus récents, la température de sommets rocheux exposés aurait augmenté pendant le siècle passé d'environ 1°C dans toute l'Europe.

Selon des scénarios plausibles, faisant intervenir l'effet de serre, la limite de la neige dans les Alpes devrait s'élever d'environ 200 m jusqu'au milieu du siècle à venir. Ce qui devrait entraîner la fonte d'une part substantielle du volume des glaciers alpins qui existent encore maintenant et le dégel accéléré de vastes pentes à permafrost, situées au-dessus de la limite des forêts. Un tel scénario prévoit un déplacement spatial du risque de coulées de boue et de chutes de glace en haute montagne et une augmentation de l'extension saisonnière du risque de crue. A long terme, la stabilité de flancs de rocher situés à haute altitude devrait diminuer, lorsque les glaciers auront cessé de jouer leur fonction d'appuis, que la température aura atteint le point de fusion dans des parties de rochers jusqu'ici gelées et que des crevasses autrefois remplies de glace se seront ouvertes à la circulation de l'eau. La recherche en ce domaine n'en est toutefois qu'à ses débuts.

Les changements les plus frappants seront vraisemblablement ceux affectant le cycle de l'eau et le paysage de montagne. L'amenuisement des glaciers sera un signe particulièrement aisé à reconnaître, indiquant que le climat s'éloigne à vitesse croissante de ce qu'on en sait au travers de l'Histoire. En ce qui concerne les risques naturels, des modèles robustes, applicables dans la pratique, devront de plus en plus remplacer les bases de décision traditionnelles, locales et empiriques (chroniques, témoins muets, statistiques etc.). Cela exige la collaboration entre autorités et scientifiques, s'appuyant sur une observation systématique permettant de reconnaître ce qui se passe effectivement – c'est à dire dans la nature.

*Prof. Wilfried Haeblerli*