

## **Objectifs climatiques et réduction des émissions**

**Une analyse et vision  
pour la politique climatique de la Suisse**



Couverture :  
Photo : C. Kull

# **Objectifs climatiques et réduction des émissions**

**Une analyse et vision  
pour la politique climatique de la Suisse**

**Editeur et distribution :**

OcCC  
Schwarztorstrasse 9  
3007 Bern  
Tél.: 031 328 23 23  
Fax: 031 328 23 20  
courriel : [occc@scnat.ch](mailto:occc@scnat.ch)  
[www.occc.ch](http://www.occc.ch)

L'Organe consultatif sur les changements climatiques (OcCC) a pour mandat de formuler des recommandations au sujet de questions touchant au climat et aux changements climatiques à l'attention de la politique et de l'Administration. Il a été créé en 1996 par le Département fédéral de l'intérieur (DFI) et le Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication (DETEC). Le mandat pour la création de cet organe a été confié à l'Académie suisse des sciences naturelles (SCNAT), laquelle a invité une trentaine de personnalités de la recherche, de l'économie et de l'Administration fédérale à collaborer au sein de cet organe consultatif. Le suivi de ce mandat par l'Administration fédérale incombe à l'Office fédéral de l'environnement (OFEV).

**Mode de citation proposé :**

OcCC, 2012: Objectifs climatiques et réduction des émissions – Une analyse et vision pour la politique climatique de la Suisse. OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques, Berne, 63 pp. ISBN: 978-3-907630-37-2

## Table des matières

<b>Editorial</b>	<b>4</b>
<b>Résumé et recommandations</b>	<b>5</b>
<b>1 Introduction</b>	<b>11</b>
<b>2 Le contexte: les effets mondiaux et nationaux du changement climatique</b>	<b>13</b>
2.1 Introduction	13
2.2 La glace, la neige et l'eau	14
2.3 Les écosystèmes, l'agriculture, la sylviculture, la chasse et la pêche	15
2.4 Les infrastructures, l'industrie et le commerce	17
2.5 La santé	18
2.6 Conclusions	18
<b>3 L'influence des émissions de gaz à effet de serre sur le climat</b>	<b>23</b>
3.1 Introduction	23
3.2 Situation initiale: le réchauffement climatique s'est poursuivi ces dernières années	24
3.3 Les émissions provenant de l'utilisation de combustibles fossiles contribuent de manière dominante au réchauffement climatique	25
3.4 « Business as usual » ou réduction des émissions: quelle part du changement climatique est-elle évitable ?	28
3.5 Conclusions	30
<b>4 Objectifs de politique climatique pour la Suisse</b>	<b>35</b>
4.1 Introduction	35
4.2 Une contribution équitable aux efforts mondiaux	37
4.3 Objectifs climatiques autonomes	41
4.4 Définition d'un objectif climatique	46
4.5 Conclusions	47
<b>5 Coûts et avantages d'un objectif climatique ambitieux</b>	<b>53</b>
5.1 La situation	53
5.2 Coûts des mesures de réduction des émissions	54
5.3 Avantages des mesures de réduction des émissions	55
5.4 Conclusions	61
<b>Les membres de l'OcCC</b>	<b>63</b>

## Editorial

### Vision Zéro

Une chose est claire, le réchauffement climatique restera un important défi politique, et ce pour de nombreuses années. Même si la communauté internationale n'est pas encore unanime aujourd'hui sur les mesures à prendre et les moyens à utiliser, elle s'est néanmoins fixé un objectif climatique, en 2010 à Cancun, lors de la Conférence des Nations Unies sur le climat : le réchauffement planétaire doit être limité à moins de 2 degrés par rapport au niveau de l'ère préindustrielle. La Suisse a retenu cet objectif et l'a ancré dans le premier article de la nouvelle loi sur le CO<sub>2</sub>. L'article énonçant le but de la loi fédérale sur la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>, adoptée en décembre 2012 par l'Assemblée nationale, précise désormais : « La présente loi vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre, en particulier les émissions de CO<sub>2</sub> dues à l'utilisation énergétique des agents fossiles (combustibles et carburants) ; l'objectif est de contribuer à ce que la hausse de la température mondiale soit inférieure à 2 °C. »

L'OcCC s'est interrogé quant à la signification de cet objectif climatique pour la Suisse et quant à l'ampleur des réductions d'émissions nécessaires pour endiguer la progression du réchauffement climatique. Pour les climatologues, il n'y a aucun doute : pour limiter les effets menaçants du réchauffement climatique, il faut diminuer radicalement les rejets de CO<sub>2</sub>. Qu'est-ce que cela implique pour la Suisse ? C'est la question qu'éclaire le présent rapport, dans lequel des scientifiques suisses ont résumé et vulgarisé leurs connaissances.

Le rapport formule les recommandations suivantes à l'intention de nos responsables politiques : La loi sur le CO<sub>2</sub> constitue un premier pas, il faudra cependant viser des objectifs beaucoup plus ambitieux à moyen terme. Il convient de diminuer le rejet de CO<sub>2</sub>, mais aussi de s'adapter aux changements environnementaux malheureusement inévitables, qui résultent de la hausse mondiale des températures. L'augmentation massive des coûts engendrés par les dommages suite à l'intensification du réchauffement et l'incapacité voire l'impossibilité de nous adapter à un changement climatique sans limite par le biais de solutions techniques, nous amènent à diminuer de manière substantielle et continue les émissions de gaz à effet de serre. Les objectifs politiques en la matière doivent être fixés en visant des émissions nulles à long terme. En d'autres termes, le rejet de CO<sub>2</sub> d'une société postmoderne doit tendre vers zéro. La Suède, par exemple, s'est fixé l'objectif ambitieux de ne plus être responsable d'émissions nettes de gaz à effet de serre d'ici 2050. La « vision zéro » doit constituer pour nous aussi la base d'une planification à long terme courageuse.

Nous sommes confrontés à l'important défi de faire muter notre société vers un mode de vie durable, à bilan de CO<sub>2</sub> neutre. Ceci implique une planification à long terme, dans le sens du développement durable, à la fois des questions touchant au climat, à l'énergie et aux ressources ainsi que des transports et de l'aménagement du territoire. La vision zéro CO<sub>2</sub>, c'est relever les défis énormes auxquels notre société est confrontée. Pour atteindre cet objectif, nous avons besoin non seulement d'instruments économiques d'incitation et de soutien, mais aussi d'introduire certaines prescriptions et normes, et surtout d'encourager l'avènement de nouvelles technologies qui permettront d'améliorer l'efficacité et d'innover.

Mes remerciements vont à la communauté scientifique qui a contribué à l'élaboration d'un rapport de grande valeur et solidement étayé.



Kathy Riklin, présidente de l'OcCC

## Résumé et recommandations

### Auteurs

L'OcCC sous la conduite de G. Hildesheimer, R. Knutti, K. Seiler et A. Spiegel

### L'essentiel en bref

Le réchauffement de l'atmosphère est manifeste. Il est dû pour l'essentiel aux émissions de CO<sub>2</sub> des activités humaines. La communauté internationale a convenu de stabiliser les gaz à effet de serre dans l'atmosphère et souhaite limiter le réchauffement planétaire à moins de « plus 2 °C » (par rapport à l'ère pré-industrielle). Des objectifs de réchauffement moins ambitieux exigent toutefois aussi une diminution des émissions de CO<sub>2</sub> au cours des prochaines décennies. A cette fin, les émissions devraient cesser d'augmenter au plus tard d'ici la fin de la présente décennie, pour diminuer radicalement par la suite. La volonté d'aboutir à un accord mondial sur la protection du climat est un aspect positif, mais le calendrier proposé n'est pas à la mesure de l'urgence de cette protection. D'où une double conséquence. Premièrement, il est plus important que jamais de renforcer l'accent mis récemment sur l'adaptation aux changements climatiques. Deuxièmement, il faut poursuivre énergiquement la réduction des émissions. L'adaptation ne doit pas occulter la nécessité de réductions supplémentaires massives des émissions, car les possibilités d'adaptation à un réchauffement de grande ampleur sont limitées par différents facteurs, économiques notamment.

Les engagements pris jusqu'ici au niveau international en matière de réduction des émissions sont insuffisants pour atteindre l'objectif de limitation du réchauffement. Une répartition équitable du fardeau implique que les différents Etats assument ensemble, mais de façon différenciée, la responsabilité de réduire les émissions. Les émissions de CO<sub>2</sub> de la Suisse, d'environ 6 tonnes (émises directement en Suisse) ou 10 tonnes (y compris les émissions grises à l'étranger) par habitant et année, sont nettement supérieures à la moyenne mondiale qui est de 5 tonnes environ. Avec la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>, la Suisse a fait un premier pas dans la bonne direction et montre qu'un objectif de réduction de 20 pour cent jusqu'en 2020 peut être atteint. Mais ce premier pas ne remplit pas encore les exigences d'une évolution à long

terme responsable et durable et n'est pas compatible avec l'objectif de protection mondial d'un réchauffement maximum de 2 °C. Des réductions bien plus importantes sont donc nécessaires : les émissions doivent baisser d'un ordre de grandeur de 80 à 95 pour cent (par rapport à 1990) à moyen terme, jusqu'en 2050, et tendre à zéro, aussi au niveau mondial, à long terme, c'est-à-dire d'ici la fin du 21<sup>e</sup> siècle. Ceci pourra exiger éventuellement le recours au stockage de CO<sub>2</sub>, vu que certaines branches de l'industrie resteront tributaires du carbone.

La Suisse a le potentiel technique et financier pour mener avec succès une politique climatique ambitieuse. Les changements prévisibles au niveau de la production, du commerce et de la consommation du fait d'une telle politique correspondent à des pertes de revenu modestes, de 0.36 à 2.5 pour cent par rapport à un scénario de référence qui ne prévoit aucune mesure de prévention. A noter en outre que si les changements climatiques continuent de progresser, il s'ensuivra des dommages et donc des coûts supplémentaires. S'y ajoute le fait qu'il ne faut pas négliger les bénéfices secondaires (p.ex. en matière de protection de l'air) d'une politique climatique ambitieuse.

Pour que la Suisse puisse faire face aux défis stratégiques qui l'attendent dans les domaines de l'adaptation au climat, de l'énergie, de la politique économique et de la coopération internationale, l'OcCC recommande le recours à une combinaison composée d'instruments économiques, de prescriptions et de promotion des technologies. Du fait de sa bonne situation économique, la Suisse peut maîtriser les défis du changement climatique mieux que bien d'autres pays. A noter cependant que le changement climatique dépend étroitement de diverses macro-tendances, telles que la croissance démographique et économique dans les pays émergents, la hausse des coûts de production de l'énergie simultanément à l'augmentation des besoins mondiaux en énergie, ainsi que les conflits qui en résultent en matière de ressources. Vu que la Suisse est fortement insérée dans le tissu économique

international, et qu'elle est donc touchée par les effets indirects du changement climatique, l'OcCC lui recommande d'intensifier, sous une forme adaptée, son engagement en matière de politique climatique nationale aussi bien qu'internationale.

## Défis

Les scientifiques estiment que les défis à venir peuvent être maîtrisés. Mais il faut pour cela abandonner les schémas de pensée et approches de solution habituels qui ont caractérisé le développement économique et social de la Suisse au 20<sup>e</sup> siècle lorsque l'énergie fossile était disponible à bon marché. Une mise en œuvre réussie d'une politique climatique tournée vers l'avenir exige de prendre en compte ses interfaces avec les politiques en matière d'énergie, de transports, d'aménagement du territoire, d'agriculture et de sylviculture.

La Suisse a de nombreuses possibilités de réduire ses émissions à un coût modéré et de développer son économie dans le sens d'une utilisation efficace de l'énergie et des ressources. Le changement climatique se déroule au niveau planétaire et dans un contexte économique de mondialisation. Les effets du changement climatique auront à moyen terme une influence négative sur l'économie mondiale. En raison de la forte intégration internationale de son économie, la Suisse agit dans son propre intérêt en aidant à mettre dès que possible sur les rails un développement international et national ambitieux et orienté vers l'avenir.

L'OcCC rend attentif au fait que la Suisse, indépendamment de sa taille, doit apporter sa contribution. Les changements économiques et sociaux nécessaires doivent également être considérés comme une chance dans la perspective d'un développement durable, tourné vers l'avenir.

Les aspects suivants sont essentiels à une politique climatique à long terme :

- La décarbonisation de l'économie : Le découplage entre croissance et consommation de ressources nécessite une transformation structurelle de l'économie. Cette dernière doit mettre en valeur des domaines basés sur la durabilité, la réparabilité, l'utilisation partagée de biens. Les organes politiques compétents sont appelés à fixer des objectifs ambitieux en matière d'émissions et d'efficacité et de définir des axes d'action stratégiques pour permettre aux entreprises de développer les modèles commerciaux correspondant à ce cadre réglementaire.
- La politique énergétique et climatique : La Suisse doit se concentrer sur ses forces spécifiques. L'alignement sur les objectifs climatiques de l'UE ou sur la restructuration du système énergétique au sein de l'UE pourrait s'avérer trop défensif et ne pas être adapté au potentiel économique de notre pays. Il peut y avoir pour la Suisse de meilleures options, autonomes, qui lui permettent d'aménager les défis à venir à son avantage. Des prix élevés de l'énergie peuvent jouer à cet égard un rôle déterminant. Des augmentations planifiables, graduelles, constituent un moteur d'innovation en matière d'efficacité. Protéger certains secteurs en pratiquant des prix de l'énergie bas, p.ex. pour les entreprises indigènes énergivores, est contre-productif et de toute façon non praticable à long terme.
- L'adaptation au changement climatique : Même en cas de limitation réussie du réchauffement planétaire à 2 °C, le changement climatique continuera à avoir des impacts directs sur l'environnement, l'économie et la société en Suisse et dans le monde. Quelques mesures d'adaptation sont déjà mises en œuvre au niveau national. Pour bien des raisons, p.ex. la quantité de ses émissions passées et son statut de pays industrialisé prospère, la Suisse devra contribuer à aider les plus pauvres dans le monde. En plus de la prévention mondiale des changements climatiques, des mesures d'adaptation sur place aideront à réduire les migrations de populations exposées à ces changements.
- L'évolution de la société : Les mesures techniques ne suffiront pas à résoudre les problèmes à venir. Il est évident, aujourd'hui déjà, que la société devra changer fondamentalement en vue d'un mode de vie plus durable pour maîtriser les défis. Un large dialogue social incluant tous les acteurs est requis pour engager cette mutation.

## Recommandations de l'OcCC en matière d'objectifs et de mesures

### Elaboration d'une politique

La révision de la loi sur le CO<sub>2</sub> a posé les conditions cadres de la politique climatique suisse jusqu'en 2020. Les mesures prévues ne suffisent cependant pas à maîtriser les défis à venir. Pour atteindre les objectifs climatiques, il convient de développer une politique cohérente et ambitieuse, axée sur le long terme. Le succès de sa mise en œuvre dépendra du soutien dont cette politique et les mesures bénéficieront auprès de la population suisse.

### Ce qu'il faut faire

- Objectifs : Les objectifs de réduction doivent être adaptés au potentiel économique et à la structure de notre pays. La reprise des réglementations de l'UE n'est pas forcément la meilleure solution. Une politique climatique autonome, tournée vers l'avenir, peut être avantageuse. L'OcCC recommande d'établir un objectif suisse de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 80 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à 1990. Un objectif d'émissions zéro est à inclure d'ores et déjà dans la discussion en tant que perspective pour la fin du siècle. La Suisse a fixé par le passé ses objectifs de politique énergétique et climatique indépendamment du cours des négociations internationales et peut continuer ainsi à l'avenir. Des objectifs faciles à communiquer, tels que la société à 2000 watts, la société à 1 tonne de CO<sub>2</sub> et la neutralité climatique, sont judicieux du point de vue politique.
- Transformation des structures énergétiques : L'OcCC recommande d'accomplir une mutation énergétique dans les meilleurs délais, en se concentrant sur l'efficacité énergétique et les formes d'énergie renouvelables. Les conditions cadres économiques doivent être fixées de manière à favoriser le système énergétique le plus efficace et le plus écologique.
- Coordination, information et participation : Les intérêts de la société, du monde politique et de l'économie doivent être pris en considération globalement aux différents échelons, sans cependant perdre de vue une mise en œuvre rapide et efficace des objectifs. A moyen et long terme, plusieurs secteurs seront touchés par le changement climatique. Seule une petite minorité a vraiment intérêt à préserver le statu quo. Une réponse politique insuffisante aux défis peut entraîner des risques inhérents au système. Nombreux seront alors les perdants. Une alliance pour une politique à long terme compatible avec le climat peut défendre avec succès les changements nécessaires.
- Fixation des priorités : Les domaines à longs cycles d'investissement, comme par exemple les bâtiments et les infrastructures, doivent être examinés quant à leur compatibilité avec les objectifs à long terme. Les réglementations correspondantes doivent être adaptées.
- Adaptation : Même si l'objectif des 2 °C est respecté, les effets du réchauffement climatique dépasseront en Suisse de loin les changements observés aujourd'hui. Il faut promouvoir et mettre en œuvre une stratégie pour l'élaboration des mesures d'adaptation nécessaires.

### Mesures à prendre à trois niveaux

- Instruments économiques : Les incitations financières viennent au premier plan des mesures. Le renchérissement des matières premières et formes d'énergie carbonées est justifié par l'internalisation des coûts externes du réchauffement climatique. Le renchérissement peut de plus contribuer à diminuer le risque d'effets de rebond : les économies réalisées en matière d'efficacité ne doivent pas entraîner un surplus de consommation de matières premières fossiles.
- Prescriptions : Il convient de fixer des prescriptions sévères en matière d'émissions et d'efficacité en cas d'absence de système d'incitation suffisamment efficace.
- Promotion des technologies : Créer ou maintenir un environnement favorable aux technologies et à l'innovation permet de développer et de diffuser de nouvelles solutions en matière de réduction des émissions et de les promouvoir par des mesures appropriées.

## Faits et contexte

- Les données scientifiques montrent que le changement climatique anthropique a déjà commencé de changer le monde, et donc aussi la Suisse (réchauffement par rapport au climat préindustriel de 0.8 °C au niveau mondial, de 1.6 °C en Suisse). Il se poursuivra et s'accélélera même en l'absence de contre-mesures. Les modifications du cycle hydrologique, la fonte de la banquise et des glaciers, la montée du niveau de la mer et d'autres conséquences, telles que le changement des régimes de précipitations, sont en accord avec le réchauffement observé et l'augmentation anthropique des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Les simulations effectuées au moyen de modèles climatiques indiquent avec une probabilité de plus de 90 pour cent que le réchauffement est causé en majeure partie par l'être humain.
- Les conséquences du changement climatique diffèrent selon la région et le secteur. Elles dépendront de plus fortement des futures émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz. Une évaluation complète des conséquences doit inclure tous les secteurs ainsi que celles qui sont générées dans les autres pays. L'irréversibilité des changements climatiques lorsqu'ils se sont produits, les incertitudes au sujet des conséquences futures ou l'impossibilité d'évaluer la valeur de nombreux biens touchés par le réchauffement (p.ex. de la biodiversité) excluent les estimations simples des coûts et des avantages. L'évaluation d'objectifs de stabilisation de la température ne peut donc pas reposer uniquement sur des arguments scientifiques, mais exige de se baser au minimum sur des hypothèses permettant de comparer le bénéfice tiré à court terme d'énergie fossile bon marché avec les dommages, coûts d'adaptation et pertes qu'elle entraîne à long terme.
- Les émissions de CO<sub>2</sub> dues à la combustion de pétrole, charbon et gaz constituent la cause principale du réchauffement climatique. Il convient toutefois de ne pas négliger les effets dus aux changements d'affectation des terres; il faut leur accorder l'attention nécessaire, si l'on entend respecter l'objectif de protection. Les émissions de CO<sub>2</sub> modifient le climat et la composition de l'atmosphère et des océans sur le très long terme. Aussi est-ce la totalité des émissions de CO<sub>2</sub> durant toute la période qui est déterminante pour la stabilisation du réchauffement climatique à n'importe quel niveau de température. Pour stabiliser le climat, ces émissions devront donc nécessairement s'approcher de zéro à long terme. Sans diminution des émissions de CO<sub>2</sub> de sources fossiles, les efforts de réduction d'autres gaz à effet de serre tombent à plat. La promotion de puits de carbone biologiques ne suffit pas à stopper le réchauffement climatique.
- Les réductions des émissions mondiales promises en 2011 pour 2020 ne constituent qu'une petite partie de la diminution requise. Si l'on entend atteindre de manière optimale l'objectif actuel des 2 °C fixé par la communauté internationale, il convient de recourir à des mesures supplémentaires pour compenser les réductions qui ne pourront pas être réalisées. Se limiter à une stabilisation du réchauffement à 2.5 °C ou 3 °C par rapport à 1990 exige tout de même de réduire de manière substantielle les émissions jusqu'à la fin du siècle. Il ne serait possible de viser un réchauffement inférieur à 2 °C qu'en dépassant temporairement la température cible et les émissions cumulées et en retirant ensuite rapidement du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère.
- Pour estimer les émissions pour 2020 et 2050, il est nécessaire de formuler des hypothèses touchant à l'économie, à la société et à la technologie (p.ex. taux de réduction possibles), ainsi que des choix relatifs à une répartition équitable du fardeau entre pays et générations. Une augmentation des émissions dans les décennies à venir implique des réductions ultérieures plus importantes et rétrécit la marge de manœuvre future. Une augmentation des émissions dans un pays doit être compensée ailleurs par de plus fortes réductions. Les objectifs typiques requis pour les Etats industrialisés se situent entre 25 et 40 pour cent d'ici 2020 (par rapport à 1990) et entre 80 et 95 pour cent jusqu'en 2050.
- Un objectif climatique ambitieux peut avoir un effet aussi bien positif que négatif du point de vue économique si l'on ignore les conséquences du changement climatique. Il est difficile d'estimer de quel côté la balance

penchera. Les effets nets plutôt négatifs découlant d'un prix de l'énergie plus élevé, en dépit d'un renforcement de l'innovation dans les technologies efficaces en énergie, auront éventuellement pour contrepartie des effets positifs en termes de fiscalité, de productivité et de moindres nuisances environnementales. C'est d'autant plus probable que l'objectif climatique sera mis en œuvre en recourant aux bons instruments. Les résultats de diverses études montrent qu'une trajectoire de réduction ambitieuse, compatible avec l'objectif des 2 °C, est ainsi praticable pour la Suisse et tout à fait supportable du point de vue économique.



## 1 Introduction

Dans le monde entier, les séries temporelles de données météorologiques montrent clairement que le réchauffement de l'atmosphère terrestre progresse sans relâche. Au niveau mondial, les températures près du sol ont augmenté d'environ 1 °C sur les continents depuis 1850 (GIEC, 2007). Au niveau régional, le réchauffement climatique se manifeste aussi clairement dans l'arc alpin. Les températures y ont augmenté de presque 1.7 °C depuis la fin du 19<sup>e</sup> siècle et cette tendance se poursuit. Le réchauffement est de 0.38 °C par décennie (MétéoSuisse). Au niveau mondial, le GIEC a réuni, dans ses divers rapports 2007 sur l'état des connaissances et dans le rapport 2013/14 à venir, les faits scientifiques ayant trait au changement climatique. Les travaux de l'OcCC/ProClim en 2007 (Les changements climatiques et la Suisse en 2050) et de l'OcCC en 2008 (Le climat change – que faire?) résument la situation pour la Suisse. Ils mettent en évidence les changements à venir au cours du 21<sup>e</sup> siècle. A noter en outre la publication, en 2011, des nouveaux scénarios climatiques pour la Suisse (Swiss Climate Change Scenarios CH2011). Ceux-ci confirment les tendances déjà publiées et montrent qu'il faut s'attendre à des changements substantiels pendant la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle. Pour des régions de faible étendue, telles que la Suisse, cela signifie que les décisions prises dans le cadre de la politique internationale au sujet des futures émissions mondiales de gaz à effet de serre auront une influence déterminante quant à l'ampleur des manifestations du changement climatique au 21<sup>e</sup> siècle et à leurs conséquences.

Lors de la Conférence de la CCNUCC, en 2010 à Cancun, au Mexique, la communauté internationale s'est engagée en faveur de l'objectif des 2 °C, qui consiste à limiter l'augmentation moyenne mondiale de la température à 2 °C par rapport au niveau préindustriel. Les scientifiques ont déjà présenté dans le rapport du GIEC de 2007 les trajectoires d'émission nécessaires au niveau mondial pour atteindre cet objectif. Des mesures de réduction sont exigées en premier lieu des pays industrialisés, et de plus en plus aussi des pays émergents. Il est donc clair que la Suisse doit aussi y apporter sa contribution.

La nouvelle loi sur le CO<sub>2</sub>, adoptée en décembre 2011 par les Chambres fédérales, dessine le cadre des engagements nationaux de réduction jusqu'en 2020. Elle fixe comme

objectif de diminuer les émissions de CO<sub>2</sub> de 20 pour cent par rapport à 1990, et ce par des mesures prises en Suisse. En cas de conclusion d'accords internationaux impliquant des efforts de réduction plus importants, l'objectif de réduction pourrait être relevé à 40 pour cent; dans ce cas, trois quarts au maximum des 20 pour cent supplémentaires pourraient être compensés à l'étranger.

Cela soulève de nouvelles questions. Quels objectifs de réduction des émissions faut-il viser au niveau mondial pour atteindre l'objectif des 2 °C? Quels objectifs en résultent pour la Suisse au-delà de 2020? Quels objectifs sont envisageables et réalisables pour la politique climatique et énergétique? Les mesures de réduction nécessaires sont-elles économiquement supportables pour la Suisse?

Ces questions sont traitées en profondeur dans le présent rapport. Les effets prévisibles des différents scénarios de changement climatique sont discutés au chapitre 2. Il compare ainsi l'évolution du scénario permettant de réaliser l'objectif «stabilisation de 2 °C à l'échelle du globe» avec celui qui présente l'échec des mesures de réduction au niveau mondial. Le chapitre 3 se penche sur les bases scientifiques du changement climatique et sur l'estimation des mesures de réduction nécessaires pour atteindre l'objectif. Le chapitre 4 présente les objectifs de réduction connus en Suisse et les évalue quant à leur pertinence pour l'avenir. Enfin, le chapitre 5 démontre que les mesures de réduction des émissions présentées antérieurement sont économiquement supportables et réalisables.



## 2 Le contexte: les effets mondiaux et nationaux du changement climatique

### Andreas Fischlin

Systems Ecology, Institute of Integrative Biology: Ecology, Evolution, and Disease, ETH Zürich, Universitätstr. 16, 8092 Zürich, andreas.fischlin@env.ethz.ch

- Les conséquences directes et indirectes du changement climatique (il ne faut pas négliger ces dernières dans un monde globalisé) ont des répercussions différentes sur la Suisse, suivant le scénario, la région et le secteur. Celles-ci sont à considérer comme d'autant plus négatives que le changement climatique sera plus prononcé.
- Du fait de sa topographie en grande partie montagneuse, la Suisse est particulièrement sensible et serait fortement touchée, directement et indirectement, par un changement climatique incontrôlé.
- Des efforts de protection efficaces, menés à temps pour éviter un changement trop prononcé du climat futur, ainsi que des adaptations au changement climatique déjà inévitable, permettent d'exploiter ses effets positifs et d'atténuer ses impacts négatifs de façon déterminante.

### 2.1 Introduction

Les données scientifiques montrent que le changement climatique anthropique a déjà commencé à changer le monde, et donc aussi la Suisse, et qu'il se poursuivra, et s'accélélera même probablement, si des contre-mesures ne sont pas prises. Depuis le 19<sup>e</sup> siècle, les températures ont augmenté en moyenne de 0.74 °C à l'échelon planétaire, et de presque 1.7 °C en Suisse (CH2011, 2011) vu qu'elles montent en général plus vite au-dessus des continents que des océans (p.ex. Ceppi et al., 2010).

Des températures plus élevées renforcent à leur tour, l'évaporation au-dessus des eaux et des terres. En outre, la capacité de l'air à stocker de la vapeur d'eau croît de 7 pour cent par degré de réchauffement (Trenberth et al., 2007). C'est pourquoi les changements de température peuvent influencer la circulation globale et donc aussi le cycle hydrologique, y compris la configuration régionale des précipitations. Les régions subtropicales et zones avoisinantes, telles que l'espace méditerranéen européen, enregistrent une diminution des précipitations estivales. A plus hautes latitudes, les quantités de pluie ont augmenté en hiver (Trenberth et al., 2007). Les événements météorologiques extrêmes, tels que les fortes précipitations, sont également devenus plus nombreux (Trenberth et al., 2007). En Suisse, les fortes précipitations ont augmenté, selon la région, de 20 à 80 pour cent en hiver pen-

dant le siècle passé (Schmidli & Frei, 2005). Faut-il s'attendre à d'autres développements? Suivant les scénarios actuels, il faut compter en Suisse avec un réchauffement de l'ordre de 5 °C jusqu'en 2100 par rapport au climat préindustriel (CH2011, 2011), en l'absence de mesures directes de politique climatique (bande de scénarios rouge, figure 3, chapitre 3). Un changement radical de cap par rapport à la tendance actuelle, notamment une réduction massive des émissions, permettrait de diminuer le réchauffement mondial à 2 °C par rapport aux valeurs préindustrielles. Ceci limiterait alors à environ 3 °C le réchauffement en Suisse (bande de scénarios bleue, domaine inférieur, figure 3, chapitre 3). Les effets prévisibles se présenteraient alors aussi autrement. Pour juger de façon complète de l'importance du changement climatique, il convient donc de comparer différents scénarios les uns avec les autres (bande de scénarios rouge versus bande bleue, figure 3, chapitre 3).

Quelles seront les répercussions du réchauffement prévisible actuel et futur? En principe, le changement climatique produit des effets variables sur la planète. Il faut donc prendre en considération toutes ses incidences pour juger de l'utilité potentielle de mesures de protection du climat. La Suisse est touchée indirectement, par les conséquences dans d'autres pays, et directement à l'intérieur de ses frontières. Ainsi, les conséquences économiques à l'étran-

ger peuvent avoir des conséquences négatives sur la demande de produits suisses. La détérioration des conditions climatiques dans des pays lointains risque d'entraîner une augmentation du nombre de réfugiés climatiques, ce qui pourrait alors avoir des conséquences pour la Suisse. Le tableau serait très incomplet si seuls étaient pris en compte les effets directs du changement climatique en Suisse.

Le changement climatique touche directement les domaines suivants: la glace et la neige, l'eau, les écosystèmes, l'agriculture, la sylviculture, la chasse et la pêche, les infrastructures, l'industrie et le commerce, le tourisme, ainsi que la santé. Ceci vaut tant au niveau planétaire que pour la Suisse, mais l'ampleur des effets est différente. Un aspect important à cet égard est le délai avec lequel le climat réagit à l'accroissement des gaz à effet de serre: le réchauffement des mers prend du temps; les glaciers et calottes polaires fondent très lentement. A leur tour, nombre d'effets du changement climatique sont à retardement et nécessitent des décennies, voire des siècles, pour se développer, par exemple dans les forêts, ou sur des pentes de montagne qui deviennent instables en raison du dégel du pergélisol. Dans le cas de la formation des sols, les processus d'adaptation peuvent même s'étendre sur des millénaires, comme le montrent des études

portant sur les changements climatiques passés (p.ex. Henne et al., 2011). Aussi faudrait-il, pour juger de l'urgence de la stabilisation des gaz à effet de serre, éviter de se fonder uniquement sur notre courte expérience du passé, mais considérer aussi les conséquences à long terme possibles ou prévisibles (p.ex. Halsnæs et al., 2007). Il faudrait déterminer également les effets irréversibles.

## 2.2 La glace, la neige et l'eau

De nouvelles études confirment, en accord avec les connaissances acquises, qu'à quelques exceptions près la fonte des glaciers s'intensifie non seulement en Suisse (p.ex. Huggel et al., 2010; Huss et al., 2010; Paul et al., 2011) (figure 1), mais dans le monde entier (Lemke et al., 2007). En comparaison avec les modélisations, on assiste ces dernières années à une accélération de la régression de la banquise arctique (Stroeve et al., 2007; Kwok et al., 2009; Rampal et al., 2011). La calotte groenlandaise a aussi perdu de la glace en quantité substantielle (p.ex. Arndt et al., 2011; Rignot et al., 2011).

Le pergélisol et la couverture neigeuse sont également touchés par cette évolution. En dépit de l'importante variabilité entre les années, il est manifeste que les conditions

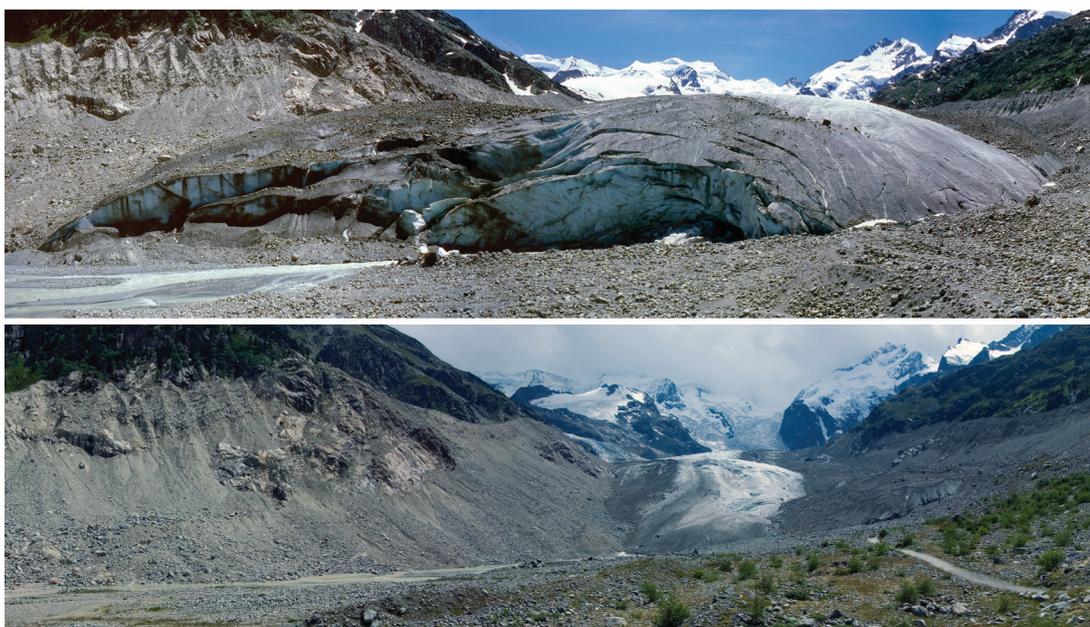


Figure 1 : Front du Vadret da Morteratsch en 1982 (en haut) et 2007. La langue du glacier a régressé de façon spectaculaire. En l'espace de 25 ans, sa longueur a diminué de 412 mètres. Cet exemple illustre le recul des glaciers qui a lieu dans le monde entier en raison du réchauffement climatique (jusqu'à présent +0.74 °C au niveau mondial, +1.7 °C en Suisse; IPCC, 2007c; CH2011, 2011). Les modélisations actuelles admettent, pour un scénario à hautes émissions de gaz à effet de serre, que dans l'arc alpin suisse, la plupart des glaciers auront presque entièrement fondu dans la seconde moitié de ce siècle. (Source: Jürg Alean, Eglisau, <http://swisseduc.ch>)

d'enneigement dans les Alpes suisses sont devenues moins sûres au cours des cinquante dernières années (p. ex. Beniston et al., 2011b). Les changements affectant la glace, la neige et le pergélisol auront des répercussions sur d'autres domaines, par exemple sur le niveau de la mer, le régime hydrologique et les infrastructures construites dans des régions à pergélisol.

Les changements du régime hydrologique sont multiples et dépendent fortement de la saison. Au premier abord, une seule et même saison peut même donner une impression contradictoire. D'une part, en ce qui concerne la période estivale, les modélisations concluent à des précipitations résolument moins abondantes et à une prolongation sensible des phases de forte sécheresse (CH2011, 2011). D'autre part, quelques scénarios montrent que les crues estivales extrêmes augmenteront au nord des Alpes (p. ex. Christensen & Christensen, 2003), comme nous l'avons vécu déjà plusieurs fois en Suisse (à mentionner par exemple les intempéries de 1987 avec des pluies diluviennes en juillet et août, de même que la crue du siècle dans les Alpes en août 2005 ou la crue de début août 2007).

Une autre image se présente à propos des précipitations hivernales. Alors qu'une tendance à une augmentation des sommes de précipitations s'est clairement manifestée pendant le siècle passé, les modèles de simulation prévoient une évolution à peine perceptible au cours du siècle actuel (CH2011, 2011). Pour les précipitations extrêmes en revanche, la plupart des modèles indiquent que la fréquence des fortes précipitations augmentera substantiellement en hiver dans de vastes parties de l'Europe, en fonction de la température, avec les risques d'inondation correspondants (Frei et al., 2006; CH2011, 2011). Déjà du seul fait de l'élévation de la limite des neiges, il faut s'attendre à d'importantes quantités d'eau de fonte; et si le temps est de surcroît variable, il s'ensuivra un risque accru d'inondations, surtout pendant les saisons de transition, comparables aux événements des 10 et 11 octobre 2011 (CH2011, 2011). La situation est similaire au printemps, car il faut compter alors avec une augmentation du risque de crues en raison d'importants écoulements d'eau de fonte. En résumé, renforcer en Suisse la protection contre les crues constitue une mesure recommandée d'adaptation au changement climatique, quelles que soient ses manifestations (p. ex. KOHS, 2007).

### 2.3 Les écosystèmes, l'agriculture, la sylviculture, la chasse et la pêche

Dans les écosystèmes, le changement climatique modifie en premier lieu la composition en espèces. De telles modifications ne se manifestent toutefois clairement qu'après avoir dépassé un certain seuil et changé le caractère d'écosystèmes entiers, en éclaircissant par exemple une forêt à tel point qu'il n'en reste plus que des buissons ou en remplaçant une forêt par une prairie alpine.

D'innombrables plantes et animaux ont déjà commencé de s'adapter au changement climatique (IPCC, 2007d; Rosenzweig et al., 2007; Rosenzweig et al., 2008). Des oiseaux migrateurs arrivent plus tôt chez nous ou nous quittent plus tard en automne. Quelques espèces sont même devenues sédentaires ou migrent moins loin dans le Sud, parce que les hivers sont assez doux en Europe centrale pour leur permettre d'y séjourner. De nombreuses plantes fleurissent plus tôt (p. ex. Defila, 2010) ou sont présentes jusqu'à cent kilomètres plus au nord (p. ex. Hickling et al., 2006) ou à plus haute altitude en montagne (p. ex. Frei et al., 2010; Maggini et al., 2011). De nouvelles espèces ont immigré; elles contribuent à la diversité biologique, mais se manifestent en partie aussi comme particulièrement nuisibles. Le dendroctone du pin ponderosa par exemple a immigré du sud dans la province canadienne de Colombie britannique où il a dépouillé ces dernières années les arbres de leurs aiguilles sur une surface de 374 000 km<sup>2</sup> de forêt de pins et fait périr la majorité d'entre eux. Les dommages sont considérables pour la sylviculture et entraînent de surcroît le dégagement de grandes quantités de CO<sub>2</sub> (Kurz et al., 2008). La chaîne des montagnes Rocheuses a fait obstacle jusqu'ici à une progression plus profonde de ce bostryche. De nouveaux parasites ou maladies des animaux et des plantes pourraient s'introduire aussi en Suisse.

Les plantes et animaux de longue durée de vie réagissent généralement aux changements après un certain délai. Dans les forêts notamment, l'ampleur des changements n'est pas encore visible, et il peut se passer encore des siècles jusqu'à ce qu'un nouvel équilibre entre le climat et la végétation se soit établi (p. ex. Fuhrer et al., 2006; Jones et al., 2009).

Le changement climatique ne se manifeste pas seulement sous la forme d'une modification de la température moyenne ou des quantités moyennes de précipitations à laquelle les



Figure 2: Photo par satellite (NASA) du 25 août 2007 avec panaches de fumée au-dessus de la Grèce méridionale. Entre le 28 juin et le 3 septembre, des incendies provoqués par la sécheresse extrême ont ravagé une surface de 2711 km<sup>2</sup>.

écosystèmes doivent progressivement s'adapter. Le nombre et l'ampleur d'événements météorologiques extrêmes (p.ex. sécheresses, fortes précipitations, inondations, tempêtes) peuvent se modifier aussi et avoir rapidement des conséquences dramatiques pour les écosystèmes. C'est ainsi que de longues périodes de sécheresse créent des conditions qui favorisent les incendies et feux de forêt de grande étendue, tels qu'ils se sont multipliés ces dernières années sur tous les continents (figure 2). Si l'on ne met pas un frein au changement climatique, il faut compter avec un accroissement significatif du risque de tels événements aussi au nord des Alpes.

Des températures plus élevées, combinées avec des précipitations suffisantes, permettent en revanche d'augmenter à plus hautes latitudes la productivité d'importantes plantes culturales telles que le blé, le maïs et le riz. Moyennant un approvisionnement suffisant en eau, la culture de la vigne aussi devrait connaître un essor dans des régions situées au nord des zones actuelles de production, du fait de l'amélioration de la qualité du vin. Dans tous ces cas, le changement climatique a un effet positif – passagèrement du moins. Par contre, au-dessus d'une certaine température, le blé, maïs, soja, coton et riz ne croissent plus de façon optimale, ce qui entraîne d'importantes pertes de productivité. Les valeurs seuils se situent par exemple aux environs de 28 °C pour le maïs, 29 °C pour le soja et 32 °C pour le coton. Elles sont déjà atteintes aujourd'hui pendant les sai-

sons chaudes dans certaines régions, comme le sud des Etats-Unis, de l'Afrique et de l'Asie, ce qui a entraîné jusqu'ici une diminution mondiale annuelle des rendements d'une quarantaine de millions de tonnes. Ceci correspond presque à la production annuelle de maïs du Brésil.

Les scénarios prédisant un changement climatique incontrôlé concluent à des sécheresses d'été plus fréquentes (bande de scénarios rouge, figure 3, chapitre 3). Une poursuite du réchauffement dans le cours de ce siècle mènerait à des diminutions considérables des rendements (p.ex. Lobell et al., 2011), lesquelles ne pourraient être atténuées que moyennant des contre-mesures en partie coûteuses, telles que l'irrigation, la reconversion à la culture de variétés résistantes à la sécheresse, voire de plantes culturales tout à fait différentes (p.ex. Finger et al., 2011).

Les tempêtes, comme la tempête d'hiver «Lothar» du 26 décembre 1999, constituent les perturbations météorologiques les plus importantes pour la sylviculture suisse (p.ex. Thürig et al., 2005). Les analyses de tendances pour l'ensemble de l'Europe pendant la seconde moitié du siècle passé font état d'une augmentation des dommages causés aux forêts par des tempêtes (Schelhaas et al., 2003) et les calculs de scénarios pour un changement climatique incontrôlé (bande de scénarios rouge, figure 3, chapitre 3) indiquent un léger accroissement des tempêtes extrêmes vers la fin du siècle actuel (Fuhrer et al., 2006). Les incertitudes restent néanmoins considérables en raison des tendances antagonistes au nord et au sud des Alpes (CH2011, 2011).

Etant donné que les tempêtes d'hiver pourraient être moins nombreuses, mais que des pointes de vent plus élevées sont envisageables (Catto et al., 2011), il n'est pas possible, dans l'état actuel de la recherche, de constater une évolution des risques de tempêtes pour la sylviculture.

Des changements des conditions climatiques n'ont pas des conséquences seulement pour certaines espèces animales et végétales, mais ils modifient aussi la biodiversité, le pilier essentiel des services écosystémiques. Au niveau mondial, le changement climatique entraînera, selon l'état actuel du savoir, un accroissement considérable du risque d'extinction d'espèces végétales et animales supérieures (p.ex. Fischlin et al., 2007; IPCC, 2007b; Anonymous, 2011; Warren et al., 2011). En Suisse aussi, la biodiversité change, toutefois des espèces ne disparaissent pas du jour au lendemain. Actuellement, elle croît localement en altitude, parce que des espèces se déplacent en raison de températures plus élevées (p.ex. Frei et al., 2010). Ceci montre que certains animaux et plantes ont déjà commencé de s'adapter au changement des conditions climatiques en progressant dans des zones plus élevées (p.ex. Holzinger et al., 2008). Mais cette forme d'adaptation prend fin abruptement quand il n'y a plus de sites disponibles plus haut. La disparition d'espèces n'a pas seulement de l'importance pour l'écosystème considéré; elle peut aussi avoir des retombées sur l'agriculture et la sylviculture ainsi que sur la médecine, du fait que des espèces sauvages font alors défaut pour l'élevage de nouvelles variétés cultivables ou la production de nouveaux médicaments.

## 2.4 Les infrastructures, l'industrie et le commerce

Pour ce qui est des infrastructures, les villes, agglomérations et autres constructions proches du littoral sont directement concernées par le changement climatique en raison de l'élévation du niveau de la mer (IPCC, 2007a). Celui-ci pourrait monter de plus de 40 centimètres d'ici la fin de ce siècle en cas de changement climatique incontrôlé, puis contraindre ensuite chaque année plus de 100 millions d'habitants des régions côtières à se déplacer, si aucune contre-mesure n'est prise (Nicholls et al., 2007).

Le réchauffement climatique aura aussi des impacts sur les constructions situées sur le pergélisol ou sur un terrain encore stabilisé par le pergélisol ou des glaciers. Environ un quart de la surface des terres de l'hémisphère Nord, soit

quelque 23 millions de km<sup>2</sup>, est occupé par le pergélisol. Si celui-ci dégèle, il peut s'ensuivre d'énormes dommages aux constructions, routes et pipelines. La couche du sol dite active, qui parcourt un cycle saisonnier de dégel et regel au-dessus de pergélisol, est aujourd'hui deux fois plus profonde qu'au début du siècle dernier (Anisimov et al., 2007). Le dégel saisonnier peut conduire à l'interruption de toutes les voies de communication dans des régions reculées. Dans le Grand Nord, de nombreuses routes sont inutilisables aujourd'hui déjà pendant 40 pour cent de l'année en raison du dégel du pergélisol.

En Suisse, 15 pour cent des remontées mécaniques sont construites sur le pergélisol (p.ex. Noetzli & Vonder Muehll, 2010). Leur stabilité pourrait être menacée, ce qui peut avoir pour conséquence de coûteuses mesures d'adaptation. Du fait du dégel du pergélisol et de la fonte des glaciers, il faut compter en outre avec davantage de chutes de pierres, glissements de terrain, laves torrentielles et inondations.

Une fréquence plus élevée des vagues de chaleur aura aussi des effets défavorables. Pendant de telles périodes, la climatisation touche par exemple à ses limites dans les trains. Les hautes températures peuvent provoquer des gauchissements plus fréquents, c'est-à-dire des déplacements latéraux des rails, ce qui accroît le danger de déraillements. Pendant l'été caniculaire de 2003, les entreprises de chemins de fer ont enregistré en gros une augmentation de 50 pour cent de gauchissements par rapport à un été moyen. Des travaux de construction permettent d'adapter les rails de manière à ce qu'ils supportent sans dommage des températures plus élevées. Ceci occasionne toutefois des coûts supplémentaires.

Il faut compter avec des changements aussi en matière d'approvisionnement en eau : selon les scénarios climatiques, les glaciers auront fortement fondu dans la seconde moitié de ce siècle (p.ex. Juvet et al., 2011a; Juvet et al., 2011b). Ceci aura des implications sur le débit des cours d'eau et donc aussi sur l'alimentation des nappes d'eau souterraines (p.ex. Vanham et al., 2009). Les scénarios CH2011 les plus récents indiquent pour la variante A2 une diminution moyenne des précipitations de 21 à 28 pour cent d'ici la fin du siècle par rapport aux conditions actuelles (CH2011, 2011) et une réduction annuelle de l'écoulement de 23 pour cent en raison de la fonte des glaciers et de l'évaporation plus forte (Huss et al., 2010).

Lors de futures périodes sèches, il faudra donc s'attendre à une pénurie d'eau et à davan-

tage de concurrence entre les utilisateurs. En Europe, l'agriculture utilise 42 pour cent de l'eau douce, mais l'industrie électrique a aussi besoin d'un débit suffisant pour la production d'électricité dans les centrales au fil de l'eau et pour le refroidissement des centrales nucléaires. Parmi ces dernières, six ont dû être arrêtées complètement en Europe pendant l'été caniculaire de 2003; dans de nombreuses autres centrales, les faibles débits ont fait subir des pertes sensibles à la production de courant (Alcamo et al., 2007; Ruebelke & Voegelé, 2011).

De nouvelles études (Société suisse d'hydrologie et de limnologie et Commission d'hydrologie) montrent certes que des précipitations d'hiver plus abondantes compensent en partie le recul des précipitations d'été pour la production d'électricité, pour autant que les émissions de gaz à effet de serre évoluent selon le scénario moyen A1B (ligne épaisse dans la bande de scénarios rouge, figure 3, chapitre 3). Si les émissions devaient toutefois suivre la tendance actuelle (bande de scénarios rouge supérieure, figure 3, chapitre 3), il n'est pas exclu que la compensation par les précipitations d'hiver soit insuffisante et que des pénuries d'eau saisonnières deviennent plus fréquentes (Beniston et al., 2011a; Huss, 2011). Ceci nécessiterait alors des mesures d'adaptation, par exemple des investissements considérables dans des bassins d'accumulation et centrales de pompage-turbinage supplémentaires.

## 2.5 La santé

L'été caniculaire de 2003 fut un événement extrême qui a causé la mort de quelque 70 000 personnes en Europe (Robine et al., 2008). Bien que les victimes fussent en majorité âgées, des études ont montré qu'il s'agissait de décès supplémentaires, à attribuer à la canicule. Une meilleure couverture sanitaire et une prise en charge renforcée auraient sans doute permis d'éviter de nombreux décès; toutefois, la vague de chaleur a frappé si fort les sujets les plus sensibles que toutes les morts n'auraient pas pu être évitées. Si le climat devait se développer selon le scénario A2 (bande de scénarios rouge supérieure, figure 3, chapitre 3), il faudrait compter vers la fin du siècle (p.ex. Juvet et al., 2011a; Juvet et al., 2011b; Société suisse d'hydrologie et de limnologie et Commission hydrologique, 2011) en moyenne avec des températures d'été aussi chaudes que celles que nous avons connues pendant l'été record 2003 (Schär et al., 2004). L'ampleur des conséquences

négatives pour l'être humain et les animaux dépendra de l'envergure des mesures de prévention (D'Ippoliti et al., 2010; Hayhoe et al., 2010).

De nouvelles études, qui tiennent compte, en plus de la température, également de l'humidité de l'air (Fischer & Schär, 2010), montrent qu'à température égale, le risque sanitaire pour les êtres humains croît avec l'humidité relative. C'est pourquoi MétéoSuisse met en garde contre la chaleur non seulement lorsque les températures menacent de dépasser certaines valeurs-seuils, mais en particulier aussi lorsqu'on s'attend de surcroît à une humidité relative élevée.

Selon le scénario de réchauffement A1B (ligne épaisse dans la bande de scénario rouge, figure 3, chapitre 3), le nombre de jours enregistrant un dépassement de la valeur limite pour une alarme chaleur, événement rare aujourd'hui (0 à 2 jours par été), augmentera dans de vastes parties de l'Europe à 30 jours par été. Ceci vaut notamment pour nombre de grandes villes, comme par exemple Lisbonne, Marseille, Rome, Budapest et Athènes (p.ex. Fischer & Schär, 2010). En cas d'évolution incontrôlée du changement climatique (bande de scénarios rouge, figure 3, chapitre 3), il faut s'attendre à une augmentation significative des risques sanitaires. Même en prenant des mesures d'adaptation rigoureuses, il faudrait s'attendre à ce que la chaleur cause encore de nombreux décès lors de canicules persistantes (Confalonieri et al., 2007).

## 2.6 Conclusions

Du fait de sa topographie en grande partie montagneuse, la Suisse réagit de façon particulièrement sensible au changement climatique. Les conséquences directes et indirectes diffèrent selon le secteur. Elles sont à considérer comme d'autant plus négatives que le changement climatique est plus prononcé. C'est pourquoi une politique climatique complète pour la Suisse devrait comprendre aussi bien des aspects d'adaptation que de protection du climat. Son intégration dans la protection internationale du climat est vivement recommandée; les efforts en vue d'un accord international doivent être intensifiés si l'on veut s'en tenir à l'objectif des 2 °C convenu au niveau international. A noter que même en respectant cet objectif des 2 °C, des mesures d'adaptation sont nécessaires en raison du changement climatique avéré ou inévitable. Des efforts en conséquence peuvent cependant atténuer de façon déterminante les effets négatifs.

## Bibliographie

- Alcamo, J., Moreno, J.M., Nováky, B., Bindi, M., Corobov, R., Devoy, R.J.N., Giannakopoulos, C., Martin, E., Olesen, J.E. & Shvidenko, A., 2007. Europe. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 541–580.
- Anisimov, O.A., Vaughan, D.G., Callaghan, T.V., Furgal, C., Marchant, H., Prowse, T.D., Vilhjálmsson, H. & Walsh, J.E., 2007. Polar regions (Arctic and Antarctic). In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 653–685.
- Anonymous, 2011. Biodiversity on the brink. *Nature Clim. Change*, 1(6): 275–275. doi: 10.1038/nclimate1223 (<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1223>)
- Arndt, D.S., Blunden, J. & Baringer, M.O., 2011. State of the climate in 2010. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 92(6): S1–S266. doi: <http://www.ncdc.noaa.gov/bams-state-of-the-climate/2010.php> (<http://dx.doi.org/http://www.ncdc.noaa.gov/bams-state-of-the-climate/2010.php>)
- Beniston, M., Stoffel, M. & Hill, M., 2011a. Impacts of climatic change on water and natural hazards in the Alps: Can current water governance cope with future challenges? Examples from the European «ACQWA» project. *ELSEVIER SCI LTD*, 14(7): 734–743. doi: 10.1016/j.envsci.2010.12.009 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2010.12.009>)
- Beniston, M., Uhlmann, B., Goyettea, S. & Ignacio Lopez-Moreno, J., 2011b. Will snow-abundant winters still exist in the Swiss Alps in an enhanced greenhouse climate? *Int. J. Climatol.*, 31(9): 1257–1263. doi: 10.1002/joc.2151 (<http://dx.doi.org/10.1002/joc.2151>)
- Catto, J.L., Shaffrey, L.C. & Hodges, K.I., 2011. Northern Hemisphere extratropical cyclones in a warming climate in the HiGEM high-resolution climate model. *J. Clim.*, 24(20): 5336–5352. doi: 10.1175/2011jcli4181.1 (<http://dx.doi.org/10.1175/2011jcli4181.1>)
- Ceppi, P., Scherrer, S.C., Fischer, A.M. & Appenzeller, C., 2010. Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *Int. J. Climatol.*: n/a-n/a. doi: 10.1002/joc.2260 (<http://dx.doi.org/10.1002/joc.2260>)
- CH2011, 2011. *Swiss Climate Change Scenarios CH2011*. ISBN 978-3-033-03065-7, published by C2SM, MeteoSwiss, ETH, NCCR Climate, and OcCC, Zurich, Switzerland, 88 pp.
- Christensen, J.H. & Christensen, O.B., 2003. Climate modelling: severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 421(6925): 805–806. doi: 10.1038/421805a (<http://dx.doi.org/10.1038/421805a>)
- Confalonieri, U., Menne, B., Akhtar, R., Ebi, K.L., Hauengue, M., Kovats, R.S., Revich, B. & Woodward, A., 2007. Human health. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 391–431.
- D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C., De'donato, F., Menne, B., Katsouyanni, K., Kirchmayer, U., Analitis, A., Medina-Ramon, M., Paldy, A., Atkinson, R., Kovats, S., Bisanti, L., Schneider, A., Lefranc, A., Iniguez, C. & Perucci, C.A., 2010. The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from the EuroHEAT project. *Environ. Health*, 9: 37. doi: 10.1186/1476-069x-9-37 (<http://dx.doi.org/10.1186/1476-069x-9-37>)
- Defila, C., 2010. Phenological retrospective 2009. *Agrarforsch. Schweiz*, 1(7-8): 266–271
- Finger, R., Hediger, W. & Schmid, S., 2011. Irrigation as adaptation strategy to climate change – a biophysical and economic appraisal for Swiss maize production. *Clim. Chang.*, 105(3-4): 509–528. doi: 10.1007/s10584-010-9931-5 (<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-010-9931-5>)
- Fischer, E.M. & Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nature Geosci.*, 2010(3): 398–403. doi: 10.1038/ngeo866 (<http://dx.doi.org/10.1038/ngeo866>)
- Fischlin, A., Midgley, G.F., Price, J.T., Leemans, R., Gopal, B., Turley, C., Rounsevell, M.D.A., Dube, O.P., Tarazona, J. & Velichko, A.A., 2007. Ecosystems, their properties, goods and services. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 211–272.
- Frei, C., Scholl, R., Fukutome, S., Schmidli, R. & Vidale, P.L., 2006. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res. D*, 111(D6): D06105. doi: 10.1029/2005jd005965 (<http://dx.doi.org/10.1029/2005jd005965>)

- Frei, E., Bodin, J. & Walther, G.R., 2010. Plant species' range shifts in mountainous areas-all uphill from here? *Bot. Helv.*, 120(2): 117–128. doi: 10.1007/s00035-010-0076-y (<http://dx.doi.org/10.1007/s00035-010-0076-y>)
- Fuhrer, J., Beniston, M., Fischlin, A., Frei, C., Goyette, S., Jasper, K. & Pfister, C., 2006. Climate risks and their impact on agriculture and forests in Switzerland. *Clim. Change*, 79(1-2): 79–102. doi: 10.1007/s10584-006-9106-6 (<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-006-9106-6>)
- Halsnæs, K., Shukla, P., Ahuja, D., Akumu, G., Beale, R., Edmonds, J., Gollier, C., Grübler, A., Duong, M.H., Markandya, A., McFarland, M., Nikitina, E., Sugiyama, T., Villavicencio, A. & Zou, J., 2007. Framing issues. In: Metz, B., Davidson, O.R., Bosch, P.R., Dave, R. & Meyer, L.A. (eds.), *Climate change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 117–167.
- Hayhoe, K., Sheridan, S., Kalkstein, L. & Greene, S., 2010. Climate change, heat waves, and mortality projections for Chicago. *J. Great Lakes Res.*, 36(Suppl 2): 65–73. doi: 10.1016/j.jglr.2009.12.009 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jglr.2009.12.009>)
- Henne, P.D., Elkin, C.M., Reineking, B., Bugmann, H. & Tinner, W., 2011. Did soil development limit spruce (*Picea abies*) expansion in the Central Alps during the Holocene? Testing a palaeobotanical hypothesis with a dynamic landscape model. *J. Biogeogr.*, 38(5): 933–949. doi: 10.1111/j.1365-2699.2010.02460.x (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2699.2010.02460.x>)
- Hickling, R., Roy, D., Hill, J., Fox, R. & Thomas, C., 2006. The distributions of a wide range of taxonomic groups are expanding polewards. *Glob. Chang. Biol.*, 12(3): 450–455. doi: 10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x (<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01116.x>)
- Holzinger, B., Huelber, K., Camenisch, M. & Grabherr, G., 2008. Changes in plant species richness over the last century in the eastern Swiss Alps: elevational gradient, bedrock effects and migration rates. *Plant Ecol.*, 195(2): 179–196. doi: 10.1007/s11258-007-9314-9 (<http://dx.doi.org/10.1007/s11258-007-9314-9>)
- Huggel, C., Salzmann, N., Allen, S., Caplan-Auerbach, J., Fischer, L., Haeberli, W., Larsen, C., Schneider, D. & Wessels, R., 2010. Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 368(1919): 2435–2459. doi: 10.1098/rsta.2010.0078 (<http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2010.0078>)
- Huss, M., 2011. Present and future contribution of glacier storage change to runoff from macroscale drainage basins in Europe. *Water Resour. Res.*, 47: W07511. doi: 10.1029/2010wr010299 (<http://dx.doi.org/10.1029/2010wr010299>)
- Huss, M., Usselman, S., Farinotti, D. & Bauder, A., 2010. Glacier mass balance in the south-eastern Swiss Alps since 1900 and perspectives for the future. *Erdkunde*, 64(2): 119–140. doi: 10.3112/erdkunde.2010.02.02 (<http://dx.doi.org/10.3112/erdkunde.2010.02.02>)
- IPCC, 2007a. Summary for policymakers. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.), *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 1–18.
- IPCC, 2007b. Summary for policymakers. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 7–22.
- IPCC, 2007c. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. In: *Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1–22.
- IPCC, 2007d. Technical summary. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 23–78.
- Jones, C., Lowe, J., Liddicoat, S. & Betts, R., 2009. Committed terrestrial ecosystem changes due to climate change. *Nature Geosci.*, 2(7): 484–487. doi: 10.1038/ngeo555 (<http://dx.doi.org/10.1038/ngeo555>)
- Jouvet, G., Huss, M., Funk, M. & Blatter, H., 2011a. Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate. *INT GLACIOL SOC.*, 57(206): 1033–1045. doi: 10.3189/002214311798843359 (<http://dx.doi.org/10.3189/002214311798843359>)
- Jouvet, G., Picasso, M., Rappaz, J., Huss, M. & Funk, M., 2011b. Modelling and numerical simulation of the dynamics of glaciers including local damage effects. *Math. Model. Nat. Phenomena*, 6(5): 263–280. doi: 10.1051/mmnp/20116510 (<http://dx.doi.org/10.1051/mmnp/20116510>)
- KOHS, 2007. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Ein Standortpapier der Kommission Hochwasserschutz im Schweizerischen Wasserwirtschaftsverband (KOHS). 99(1): 55–57. doi: [http://www.swv.ch/Dokumente/Fachartikel-SWV-28Download-Ordner29/Klima-und-Hochwasserschutz\\_WEL-1-2007.pdf](http://www.swv.ch/Dokumente/Fachartikel-SWV-28Download-Ordner29/Klima-und-Hochwasserschutz_WEL-1-2007.pdf) ([http://dx.doi.org/http://www.swv.ch/Dokumente/Fachartikel-SWV-28Download-Ordner29/Klima-und-Hochwasserschutz\\_WEL-1-2007.pdf](http://dx.doi.org/http://www.swv.ch/Dokumente/Fachartikel-SWV-28Download-Ordner29/Klima-und-Hochwasserschutz_WEL-1-2007.pdf))

- Kurz, W.A., Dymond, C.C., Stinson, G., Rampley, G.J., Neilson, E.T., Carroll, A.L., Ebata, T. & Safranyik, L., 2008. Mountain pine beetle and forest carbon feedback to climate change. *Nature*, 452(7190): 987–990. doi: 10.1038/nature06777 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature06777>)
- Kwok, R., Cunningham, G.F., Wensnahan, M., Rigor, I. & Zwally, H.J.Y.D., 2009. Thinning and volume loss of the Arctic Ocean sea ice cover: 2003–2008. *J. Geophys. Res. C*, 114: C07005. doi: 10.1029/2009jc005312 (<http://dx.doi.org/10.1029/2009jc005312>)
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H. & Zhang, T., 2007. Observations: changes in snow, ice and frozen ground. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.), *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 337–383.
- Lobell, D.B., Bänziger, M., Magorokosho, C. & Vivek, B., 2011. Nonlinear heat effects on African maize as evidenced by historical yield trials. *Nature Rep. Clim. Change*(Published online: 13 March 2011): 1–4. doi: 10.1038/nclimate1043 (<http://dx.doi.org/10.1038/nclimate1043>)
- Maggini, R., Lehmann, A., Kery, M., Schmid, H., Beniston, M., Jenni, L. & Zbinden, N., 2011. Are Swiss birds tracking climate change? Detecting elevational shifts using response curve shapes. *Ecol. Model.*, 222(1): 21–32. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2010.09.010 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.010>)
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V., Codignotto, J., Hay, J., McLean, R., Ragoonaden, S. & Woodroffe, C.D., 2007. Coastal systems and low-lying areas. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge a.o., pp. 315–357.
- Noetzi, J. & Vonder Muehll, D. (eds.), 2010. PERMOS 2010: Permafrost in Switzerland 2006/2007 and 2007/2008. *Glaciological Report Permafrost No. 8/9*, Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences c/o University of Fribourg, Fribourg, Switzerland, 68 pp.
- Paul, F., Bauder, A., Marty, C. & Nötzli, J., 2011. Schnee, Gletscher und Permafrost 2009/10 – Kryosphärenbericht der Schweizer Alpen. *Die Alpen*, 87(7): 46–52. doi: [http://alpen.sac-cas.ch/de/archiv/2011/201107/ad\\_2011\\_07\\_09.pdf](http://alpen.sac-cas.ch/de/archiv/2011/201107/ad_2011_07_09.pdf) ([http://dx.doi.org/http://alpen.sac-cas.ch/de/archiv/2011/201107/ad\\_2011\\_07\\_09.pdf](http://dx.doi.org/http://alpen.sac-cas.ch/de/archiv/2011/201107/ad_2011_07_09.pdf))
- Rampal, P., Weiss, J., Dubois, C. & Campin, J.M., 2011. IPCC climate models do not capture Arctic sea ice drift acceleration: Consequences in terms of projected sea ice thinning and depar. *J. Geophys. Res. C*, 116: C00D07. doi: 10.1029/2011jc007110 (<http://dx.doi.org/10.1029/2011jc007110>)
- Rignot, E., Velicogna, I., van den Broeke, M.R., Monaghan, A. & Lenaerts, J., 2011. Acceleration of the contribution of the Greenland and Antarctic ice sheets to sea level rise. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L05503. doi: 10.1029/2011gl046583 (<http://dx.doi.org/10.1029/2011gl046583>)
- Robine, J.M., Cheung, S.L.K., Le Roy, S., Van Oyen, H., Griffiths, C., Michel, J.P. & Herrmann, F.R., 2008. Death toll exceeded 70 000 in Europe during the summer of 2003. *C. R. Biol.*, 331(2): 171–U5. doi: 10.1016/j.crvi.2007.12.001 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.crvi.2007.12.001>)
- Rosenzweig, C., Casassa, G., Karoly, D.J., Imeson, A., Liu, C., Menzel, A., Rawlins, S., Root, T.L., Seguin, B. & Tryjanowski, P., 2007. Assessment of observed changes and responses in natural and managed systems. In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J. & Hanson, C.E. (eds.), *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 79–131.
- Rosenzweig, C., Karoly, D., Vicarelli, M., Neofotis, P., Wu, Q.G., Casassa, G., Menzel, A., Root, T.L., Estrella, N., Seguin, B., Tryjanowski, P., Liu, C.Z., Rawlins, S. & Imeson, A., 2008. Attributing physical and biological impacts to anthropogenic climate change. *Nature*, 453(7193): 353–U20. doi: 10.1038/nature06937 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature06937>)
- Ruebelke, D. & Voegelé, S., 2011. Impacts of climate change on European critical infrastructures: The case of the power sector. *Environ. Sci. Pol.*, 14(1): 53–63. doi: 10.1016/j.envsci.2010.10.007 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.envsci.2010.10.007>)
- Schär, C., Vidale, P.L., Lüthi, D., Frei, C., Häberli, C., Liniger, M.A. & Appenzeller, C., 2004. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature*, 427(6972): 332–336. doi: 10.1038/nature02300 (<http://dx.doi.org/10.1038/nature02300>)
- Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J. & Schuck, A., 2003. Natural disturbances in the European forests in the 19th and 20th centuries. *Global Change Biol.*, 9(11): 1620–1633. doi: 10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x (<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00684.x>)
- Schmidli, J. & Frei, C., 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int. J. Climatol.*, 25(6): 753–771. doi: 10.1002/joc.1179 (<http://dx.doi.org/10.1002/joc.1179>)

- Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie und Hydrologische Kommission, 2011. Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wasserkraftnutzung – Synthesebericht. In: Schweizerische Gesellschaft für Hydrologie und Limnologie und Hydrologische Kommission (ed.), Beitr. Hydrol. Schweiz. Universität Bern, Bern, Switzerland, p. 28.
- Stroeve, J., Holland, M.M., Meier, W., Scambos, T. & Serreze, M.C., 2007. Arctic sea ice decline: Faster than forecast. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L09501, doi:10.1029/2007GL029703. doi: 10.1029/2007gl029703 (<http://dx.doi.org/10.1029/2007gl029703>)
- Thürig, E., Palosuo, T., Bucher, J. & Kaufmann, E., 2005. The impact of windthrow on carbon sequestration in Switzerland: a model-based assessment. *For. Ecol. Manage.*, 210(1-3): 337–350. doi: 10.1016/j.foreco.2005.02.030 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.030>)
- Trenberth, K.E., Jones, P.D., Ambenje, P., Bojariu, R., Easterling, D., Klein Tank, A., Parker, D., Rahimzadeh, F., Renwick, J.A., Rusticucci, M., Soden, B. & Zhai, P., 2007. Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M. & Miller, H.L. (eds.), *Climate change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 235–336.
- Vanham, D., Fleischhacker, E. & Rauch, W., 2009. Impact of an extreme dry and hot summer on water supply security in an alpine region. *Water Sci. Technol.*, 59(3): 469–477. doi: 10.2166/wst.2009.887 (<http://dx.doi.org/10.2166/wst.2009.887>)
- Warren, R., Price, J., Fischlin, A., Midgley, G. & Santiago de la Nava, S., 2011. Increasing impacts of climate change upon ecosystems with increasing global mean temperature rise. 106: 141–177

## 3 L'influence des émissions de gaz à effet de serre sur le climat

### Fortunat Joos

Physique du climat et de l'environnement, Institut de physique et Centre Oeschger pour la recherche sur le climat, Université de Berne, Sidlerstrasse 5, 3012 Berne, fortunat.joos@oeschger.unibe.ch

### Reto Knutti

Institute for Atmospheric and Climate Science, ETH Zurich, Universitätstrasse 16, 8092 Zurich, reto.knutti@env.ethz.ch

- La température moyenne à la surface du globe est un indicateur général du climat. La température, les précipitations et le vent varient plus ou moins fortement suivant les régions; il en va de même de la fréquence et gravité des vagues de chaleur, sécheresses, fortes précipitations et inondations.
- L'augmentation annuelle des émissions de gaz à effet de serre est nettement supérieure à l'évolution compatible avec l'objectif souvent cité d'un réchauffement planétaire de 2°C au maximum.
- Les émissions de CO<sub>2</sub> des combustibles fossiles dominent dans le réchauffement climatique actuel en comparaison d'autres sources de CO<sub>2</sub>, d'autres gaz à effet de serre et de facteurs naturels. Selon toute attente, les sources fossiles continueront à jouer un rôle prédominant à l'avenir.
- Les émissions de CO<sub>2</sub>, produites lors de l'utilisation du pétrole, du gaz et du charbon, s'accumulent dans le système climatique et auront une influence irréversible sur le climat et la composition de l'atmosphère et des océans durant les prochains millénaires.
- Pour obtenir une stabilisation de la température à la surface de la Terre, il faut que les émissions de CO<sub>2</sub> diminuent au niveau mondial et tendent à long terme vers zéro.
- Sans diminution des émissions de CO<sub>2</sub> des sources fossiles, les efforts de réduction d'autres gaz à effet de serre tombent à plat. Le développement de puits biologiques de CO<sub>2</sub> ne permet pas à lui seul de stopper le réchauffement climatique.
- Plus tôt l'on parviendra à mettre en œuvre des mesures efficaces de réduction des émissions de gaz à effet de serre, plus grandes seront les chances de ralentir et limiter le réchauffement climatique. La longue persistance du CO<sub>2</sub> dans l'air ainsi que l'inertie des systèmes climatique et économique exigent des décisions rapides pour atteindre des objectifs climatiques spécifiques.
- Plus tôt l'on prendra des mesures, plus grande sera la marge de manœuvre subsistant à l'avenir.

### 3.1 Introduction

Le réchauffement climatique anthropique est déterminé par les émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), d'autres gaz à effet de serre et d'aérosols. Des modèles simulant le système terrestre permettent de calculer des évolutions probables du climat pour différents scénarios d'émissions et de répondre aux questions suivantes (Siegenthaler, 1978; Schimel, 1997):

Comment est-il possible d'obtenir une stabilisation à long terme du réchauffement climatique anthropique? Combien de CO<sub>2</sub> et d'autres

gaz à effet de serre est-il permis d'émettre si le climat doit être stabilisé? Dans quelle mesure le réchauffement climatique futur peut-il être encore évité? Quels changements sont-ils inévitables pendant les prochaines décennies en raison de l'inertie des systèmes énergétique et climatique?

Certains scénarios prévoient la mise en œuvre d'efforts considérables, mais efficaces permettant de réduire les émissions futures. Lorsqu'on les compare avec d'autres scénarios qui ne prévoient pas d'efforts comparables, il

est possible d'estimer les effets des émissions évitées.

La température moyenne à la surface du globe est l'un des meilleurs indicateurs généraux permettant de comparer les effets de différents scénarios. Les variations de cet indicateur climatique sont étroitement liées aux modifications régionales de la température, des précipitations, du vent, de la fréquence et gravité des vagues de chaleur et sécheresses, des fortes précipitations et des inondations.

### 3.2 Situation initiale: le réchauffement climatique s'est poursuivi ces dernières années

Les effets physiques de la perturbation anthropique du climat sont très bien documentés par des observations (IPCC, 2007a, CH-2050, traduction de SPM AR4). Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant d'activités humaines modifient la composition de l'atmosphère et l'état géochimique des océans dans une mesure probable-

ment supérieure à la fluctuation naturelle de ce dernier million d'années. La concentration actuelle du CO<sub>2</sub> atmosphérique de 390 ppm dépasse largement la fluctuation naturelle de 172 à 300 ppm documentée par l'examen de carottes glacières couvrant les derniers 800 000 ans (Lüthi et al., 2008). La concentration de CO<sub>2</sub> change à une vitesse comparativement élevée. Pendant l'ère industrielle, l'augmentation du CO<sub>2</sub> et la perturbation du bilan énergétique de l'atmosphère terrestre par le CO<sub>2</sub>, le méthane (CH<sub>4</sub>) et le gaz hilarant (N<sub>2</sub>O), tous trois des gaz à effet de serre, dépassent les taux naturels de ces 16 000 dernières années au moins (Joos and Spahni, 2008). Les émissions de CO<sub>2</sub> font augmenter la teneur en acide des océans. Ce processus est désigné par le terme d'acidification de l'océan (Steinacher, 2009; Caldeira, 2003; Doney, 2009).

Le réchauffement du système climatique est sans équivoque: des observations documentent l'augmentation des températures moyennes de l'air et des mers au niveau mondial, la fonte généralisée de la neige et des

#### Encadré 3.1: Les émissions de CO<sub>2</sub> de la Suisse

46 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> ont été libérées dans l'atmosphère en Suisse en 2010.<sup>a</sup> De ces émissions de CO<sub>2</sub> à l'intérieur du pays, en gros 38 pour cent sont imputables aux carburants, 48 pour cent aux combustibles, et les 14 pour cent restant à diverses autres sources. Entre 1990 et 2010, les émissions de CO<sub>2</sub> des carburants ont augmenté de 13 pour cent environ. Celles des combustibles par contre ont baissé de 12 pour cent. Cette diminution tient pour moitié aux bonnes conditions climatiques de la période considérée et à la moindre consommation d'énergie qui en découle pour le chauffage. Une part substantielle des émissions de CO<sub>2</sub> coengendrées par la Suisse – les émissions de CO<sub>2</sub> dites « grises » – est associée à l'importation et exportation de biens et de services. Jungbluth N. (2007) estime que cette part équivaut à 78 pour cent des émissions à l'intérieur du pays.

La Suisse, qui compte environ 1 pour mille de la population mondiale, est responsable selon les estimations de 80 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, soit environ 2 pour mille des émissions mondiales anthropiques de CO<sub>2</sub>. Les émissions moyennes de CO<sub>2</sub> par personne habitant la Suisse<sup>b</sup>, d'environ 6 tonnes par année de CO<sub>2</sub> émis directement dans le pays ou de 10 tonnes, émissions grises incluses, sont nettement supérieures à la moyenne mondiale qui est en gros de 5 tonnes de CO<sub>2</sub> par habitant et année.<sup>c</sup>

Le Protocole de Kyoto considère les émissions de différents gaz à effet de serre, pas seulement le CO<sub>2</sub>. Les émissions de chacun de ces gaz sont exprimées en équivalents de CO<sub>2</sub>. Selon le Protocole de Kyoto, les émissions totales de gaz à effet de serre au niveau national ont à peine changé entre 1990 et 2010. Elles ont fluctué entre 51 et 55 millions de tonnes d'équivalents de CO<sub>2</sub> par an.<sup>d</sup>

a) Office fédéral de l'environnement. Emissions d'après la loi sur le CO<sub>2</sub> et d'après le Protocole de Kyoto, actualisation du 13.4.2012 pour 2010 (<http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/09572/index.html?lang=fr>); 2012. A ceci s'ajoutent environ 4 millions de t de CO<sub>2</sub> des transports internationaux aériens et par bateau.

b) Office fédéral de la statistique: <http://www.bfs.admin.ch/bfs/portal/fr/index/themen/01/02/blank/key/bevoelkerungsstand/02.html>, 28 juin 2012; population en 2010: au total 7 870 134 personnes.

c) Population mondiale: en gros 7 milliards d'habitants; émissions au niveau mondial: environ 37 Gt CO<sub>2</sub>/an au total

d) Office fédéral de l'environnement. Emissions d'après la loi sur le CO<sub>2</sub> et d'après le Protocole de Kyoto, actualisation du 13.4.2012 pour 2010 (<http://www.bafu.admin.ch/klima/09570/09572/index.html?lang=fr>); 2012.

glaces, l'élévation du niveau moyen de la mer ainsi que des changements de la circulation atmosphérique et des précipitations (IPCC, 2007a). Cette dernière décennie (2000 à 2009) a été en moyenne mondiale la plus chaude depuis l'introduction de mesures réalisées à l'aide d'instruments (<http://data.giss.nasa.gov/gistemp>). Des reconstitutions du climat de ces derniers mille ans attestent que des influences humaines ont élargi de 75 pour cent le domaine des fluctuations de température et que la température sur le globe à la fin du 20<sup>e</sup> siècle est de 0.3 °C supérieure à celle des phases chaudes naturelles du dernier millénaire (Frank et al., 2010).

Le changement climatique observé va se poursuivre. Les différentes variantes étudiées en matière d'évolution des émissions pendant le 21<sup>e</sup> siècle vont dans le sens d'une poursuite du réchauffement planétaire. Un réchauffement planétaire de 0.4 °C environ est attendu pour les deux prochaines décennies. Des émissions continues d'une ampleur égale ou même supérieure au niveau actuel causeraient un réchauffement de longue durée bien plus élevé. Elles conduiraient à des changements du système climatique planétaire beaucoup plus importants au 21<sup>e</sup> siècle que ceux observés au 20<sup>e</sup> siècle (IPCC, 2007a).

### 3.3 Les émissions provenant de l'utilisation de combustibles fossiles contribuent de manière dominante au réchauffement climatique

Les émissions de CO<sub>2</sub> dominent dans le réchauffement climatique anthropique (figure 1; Strassmann et al., 2009). Pour l'ère industrielle, la part du réchauffement due à l'accroissement du CO<sub>2</sub> est à peu près égale à celle imputable à l'augmentation de tous les autres gaz à effet de serre. La part du réchauffement causée par le CO<sub>2</sub> continuera d'augmenter. De nombreux scénarios montrent qu'à la fin du siècle le CO<sub>2</sub> contribuera au moins deux fois plus au réchauffement que l'ensemble des autres gaz à effet de serre. En 2100, la part moyenne du CO<sub>2</sub> dans le réchauffement par rapport à la totalité des gaz à effet de serre se montera à 68 pour cent (58 à 76 pour cent pour les vingt-deux scénarios étudiés, voir encadré 3.2).

Les particules en suspension dans l'air, les aérosols, peuvent participer soit au refroidissement soit au réchauffement de la planète (Forster, 2007). Les particules de soufre, qui réfléchissent la lumière du soleil dans l'espace, sont particulièrement importantes à cet égard. On

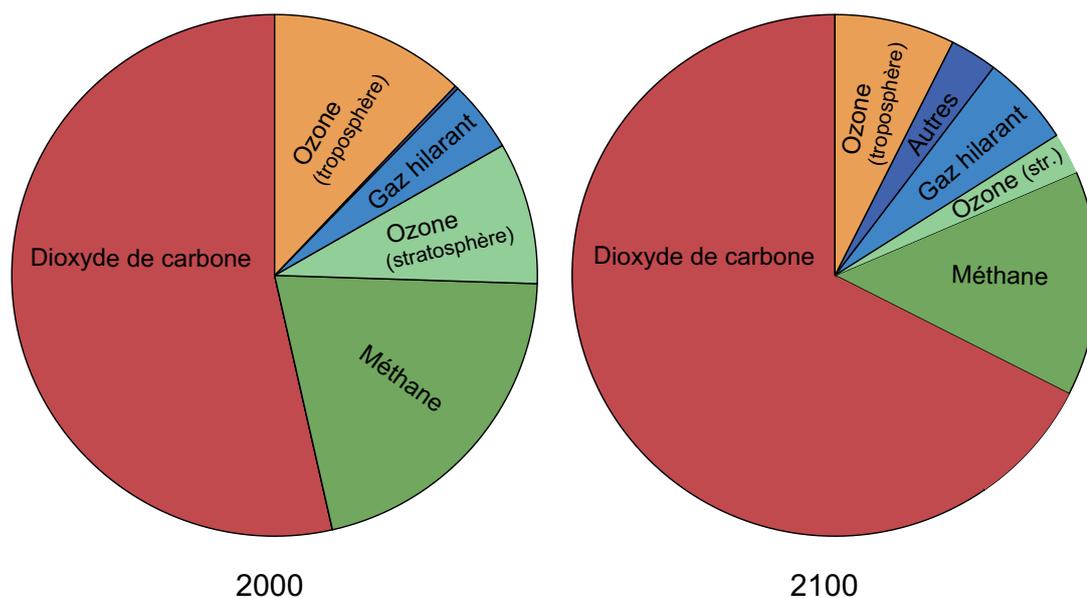


Figure 1 : Part relative de différents gaz à effet de serre à l'élévation de la température mondiale jusqu'en l'an 2000 (à gauche) et jusqu'en 2100 (à droite). Pour 2100, le graphique représente les moyennes des vingt-deux scénarios examinés (d'après Strassmann et al., 2009). La part « ozone (stratosphère) » prend en compte, à part l'ozone dans la haute atmosphère, aussi les gaz figurant dans le Protocole de Montréal pour la protection de la couche d'ozone.

estime que sans l'action des aérosols, le réchauffement planétaire serait aujourd'hui au moins de 50 pour cent plus important (Huber und Knutti, 2011). A l'avenir, les aérosols devraient jouer un rôle climatique nettement moins important. Les émissions de soufre diminuent dans le monde entier (Smith, 2011). L'usage de plus en plus répandu de combustibles et carburants à faible teneur de soufre ainsi que de filtres permettant d'évacuer le soufre dans les pays industrialisés permet de limiter les effets nocifs de ces émissions pour la santé humaine, les écosystèmes et les infrastructures.

Il est aussi possible de comparer approximativement les émissions de différents gaz pour une année isolée, mais alors il faut tenir compte de leurs différentes durées de séjour dans l'atmosphère. Pour les gaz réglementés par le Protocole de Kyoto, la contribution du CO<sub>2</sub> aux émissions mondiales en 2004 est estimée à environ 77 pour cent, celle du méthane à 14, du gaz hilarant à 8 et d'autres gaz à 1 pour cent (IPCC, 2007b). Ceci réfute l'allégation fré-

quente selon laquelle les vaches et autres ruminants seraient responsables de la plus grande partie du réchauffement climatique, sans disconvenir que ces animaux y contribuent effectivement par le méthane qu'ils rejettent.

Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la combustion de pétrole, charbon et gaz ont augmenté d'un facteur de plus de 7 depuis la fin de la Seconde Guerre mondiale. Cette croissance a continué ces dernières années et a atteint un nouveau record en 2010 en dépit d'une économie en faible croissance. Aujourd'hui, quelque 30 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (Gt CO<sub>2</sub>) sont émises chaque année dans le monde par des sources fossiles. A ceci s'ajoutent près de 5 Gt CO<sub>2</sub> provenant du déboisement et d'autres changements d'affectation du sol ainsi que 1.5 Gt CO<sub>2</sub> issues de la production de ciment (figure 2). L'utilisation de combustibles fossiles constitue aussi une cause majeure de l'accroissement d'autres gaz à effet de serre importants, tels que le méthane et l'ozone, ainsi que la suie, les aérosols et les autres polluants atmos-

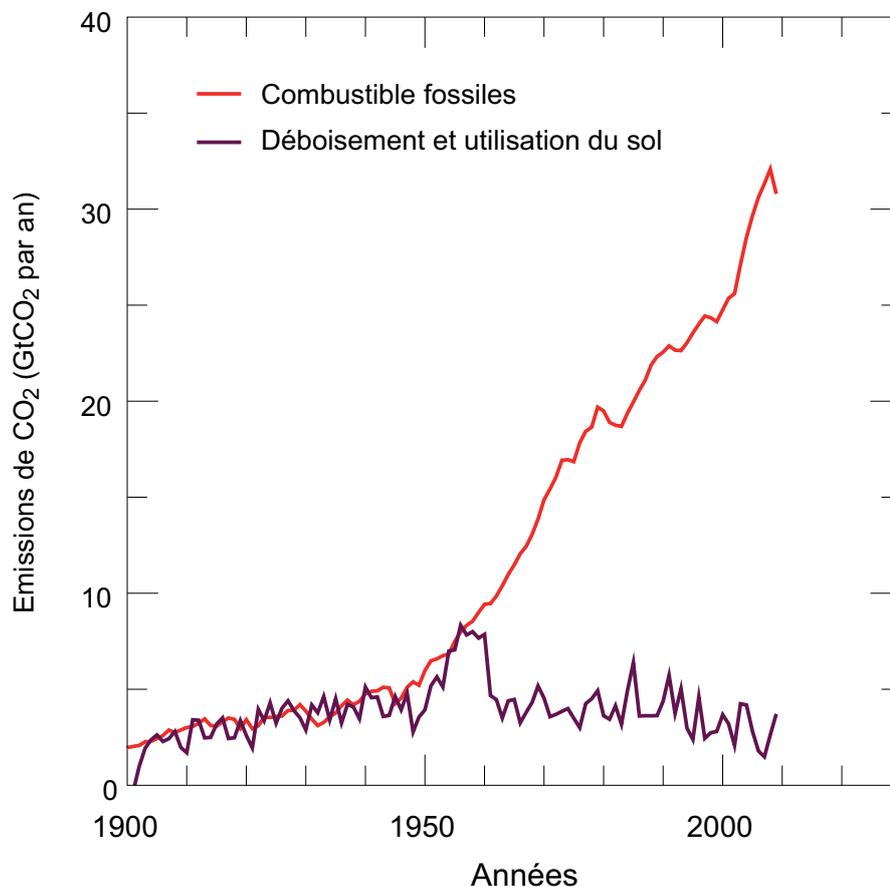


Figure 2 : Emissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'utilisation de combustibles fossiles (en rouge, part due à la production de ciment incluse) et de changements de l'utilisation du sol. Source des données : Marland et al. ([http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth\\_reg.html](http://cdiac.ornl.gov/trends/emis/meth_reg.html)) et Stocker et al., 2011.

### Encadré 3.2: Les scénarios – des trajectoires possible

Les scénarios permettent d'étudier diverses trajectoires des émissions de gaz à effet de serre et leur influence sur le climat, le système de la Terre, l'économie et la société (Nakicenovic, 2000 ; Van Vuuren, 2008 ; Weyant, 2006). Il ne faut pas les confondre avec des prévisions: ils servent à analyser les effets de différentes évolutions sans porter de jugement sur leur probabilité de réalisation. Les projections climatiques pour des scénarios d'émissions donnés sont à prendre dans le sens de relations du type « si-alors ». Elles permettent de discuter et quantifier les conséquences de différentes hypothèses, en soi cohérentes, relatives à des développements technologiques, à des décisions politiques, à la consommation d'énergie, à l'évolution de la population et de l'économie, etc.

Un groupe de scénarios est fondé sur des trajectoires fortement idéalisées pour étudier des processus, rétroactions, échelles de temps et inerties du système climatique. Ces scénarios sont utilisés pour leur pertinence illustrative. Les trajectoires idéalisées conduisant à une stabilisation de la concentration des gaz à effet de serre (figure 4) constituent un exemple.

Un groupe important de scénarios est développé dans le cadre des modèles dits d'évaluation intégrée (MEI) (Weyant, 2006 ; Nakicenovic, 2000). Ces modèles représentent le système énergétique et d'autres secteurs de l'économie, tels que le commerce et l'agriculture. Ils se basent sur des hypothèses plausibles ayant trait au développement économique, démographique, technique et social. Ils tiennent compte de l'inertie du système économique et optimisent ses coûts totaux. Les émissions des plus importants gaz à effet de serre anthropiques ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , hydrocarbures halogénés et  $\text{SF}_6$ ) y sont quantifiées, de même que celles des aérosols et des polluants atmosphériques qui contribuent à la formation de l'ozone. Les changements auxquels il faut s'attendre en matière de forçage radiatif sont également calculés. Celui-ci est une mesure de la perturbation du bilan énergétique de la Terre.

Les scénarios « business as usual » (scénarios BaU, appelés aussi scénarios de référence), qui ne prévoient pas de mesures explicites pour protéger le climat (figure 3, domaine rouge), font aussi partie de ce groupe. Ils incluent néanmoins, en premier lieu, des améliorations notables de l'intensité énergétique et, en second lieu, une large diffusion de la production d'énergie libre de  $\text{CO}_2$  (Edmonds et al., 2004). Dans les scénarios BaU, l'amélioration de l'intensité énergétique entraîne d'ici 2100 une diminution de 55 à 90 pour cent de la demande d'énergie primaire par unité du produit social brut. Dans certains scénarios BaU, la part des énergies non fossiles atteint la demande globale d'énergie en 1990 ou la surpasse même. Une amélioration substantielle de l'efficacité énergétique et la diffusion d'énergies de substitution sont donc attendues déjà dans le cadre du progrès technique « normal ». En d'autres termes: toute amélioration de l'efficacité énergétique et tout développement d'énergies de substitution ne doit pas être taxé d'emblée de succès de la politique climatique.

Des scénarios de réduction qui conduisent à une stabilisation de la température mondiale sont aussi analysés à l'aide de modèles d'évaluation intégrée. On introduit une condition supplémentaire: le forçage radiatif est stabilisé d'ici 2100 sur une valeur cible; on calcule ensuite la trajectoire d'émission la plus avantageuse qui satisfait cette exigence et permet ainsi d'atteindre une stabilisation de la température mondiale (figure 3, domaine bleu). Les questions touchant à la faisabilité politique sont volontairement laissées de côté. Il est nécessaire d'introduire des mesures supplémentaires permettant de prévenir le rejet d'émissions. Une réduction du  $\text{CO}_2$  peut être obtenue avec un bon rapport coût-efficacité en augmentant davantage l'efficacité énergétique et en recourant plus intensément à des technologies émettant peu ou pas de  $\text{CO}_2$ . D'autre part, les réductions des émissions sont limitées du fait du temps de renouvellement des installations de production (Davis et al., 2010) et du volume d'investissements disponible. Il s'ensuit pour les scénarios les plus ambitieux des émissions totales cumulées de  $\text{CO}_2$  d'environ 3700 Gt  $\text{CO}_2$  au cours de l'ère industrielle et du 21<sup>e</sup> siècle (Van Vuuren, 2008). Environ la moitié a déjà été émise (Marland, 2008 ; Houghton, 2008). En cas de réalisation des scénarios les plus ambitieux, on estime à environ 66 pour cent la probabilité de réaliser la valeur cible relative à l'augmentation de la température mondiale, citée à maintes occasions, soit une augmentation moyenne de la température de 2°C par rapport à l'ère préindustrielle.

phériques. Des effets secondaires positifs en matière de protection de l'air résultent donc de l'abaissement des émissions de CO<sub>2</sub> provenant de sources fossiles.

La modification par l'homme des conditions environnementales (température, précipitations, CO<sub>2</sub> atmosphérique, dépôt d'azote) a des impacts sur les cycles « naturels » des substances. C'est ainsi qu'il faut s'attendre à une augmentation des émissions de méthane et gaz hilarant par des écosystèmes naturels, et à voir des écosystèmes qui sont actuellement des puits de CO<sub>2</sub>, se transformer en sources de ce gaz. La libération accrue de méthane par des hydrates de méthane est également un sujet de préoccupation. Des émissions supplémentaires de gaz à effet de serre dans l'atmosphère accentuent le réchauffement climatique. Le risque d'un accroissement massif des émissions de gaz à effet de serre augmente lorsque les émissions provenant d'activités humaines sont plus élevées.

### 3.4 « Business as usual » ou réduction des émissions : quelle part du changement climatique est-elle évitable ?

Pour stabiliser le réchauffement climatique, il faudra baisser fortement les émissions dans le

monde entier au cours des décennies à venir. La figure 3 montre l'évolution des émissions de CO<sub>2</sub> pour différents scénarios basés sur la poursuite des pratiques actuelles (scénarios « business as usual » BaU) ainsi que pour des scénarios de stabilisation (voir encadré 3.2 « Les scénarios »). Dans tous les scénarios BaU, les émissions continuent d'augmenter au cours des cent prochaines années. Les scénarios de stabilisation présentent une autre évolution : les émissions atteignent un maximum entre 2020 et 2040 avant de baisser. Les émissions de CO<sub>2</sub> relatives aux différents objectifs de stabilisation se situent ainsi au 21<sup>e</sup> siècle entre 1360 et 4180 Gt CO<sub>2</sub>. Des émissions plus élevées sont associées à des valeurs cibles de la température planétaire plus élevées.

La figure 3 montre qu'il existe un excédent d'émissions entre les scénarios BaU et de stabilisation. Des mesures politiques, techniques et économiques doivent combler cet écart par rapport aux objectifs, afin de stabiliser le réchauffement climatique à un niveau relativement bas.

Les changements climatiques sont beaucoup plus faibles pour les trajectoires basées sur la variante stabilisation que pour celles basées sur les scénarios BaU. La différence devient particulièrement importante dans la seconde moitié du 21<sup>e</sup> siècle : tous les scénarios

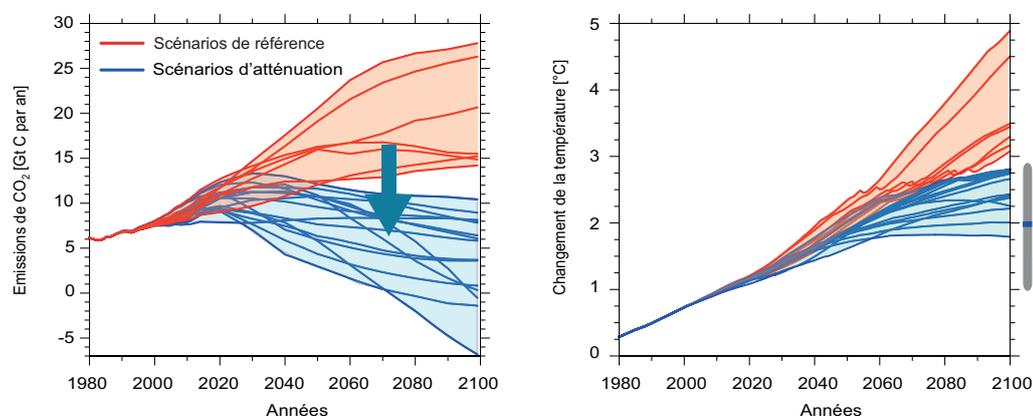


Figure 3 : Scénarios « business as usual » (bande rouge) et scénarios menant à une stabilisation de la température (bande bleue). (a) émissions de CO<sub>2</sub>, (b) température moyenne à la surface du globe d'après le « modèle de Berne » du cycle climat-carbone (Joos, 2011). La flèche bleue symbolise le dépassement des émissions par rapport à l'objectif – dépassement qui devrait être comblé pour stabiliser la température. Les incertitudes pour 2100 (barre grise) sont indiquées pour les quatre scénarios qui seront examinés de façon approfondie par la prochaine évaluation du Conseil de l'ONU pour le climat (GIEC). (Moss et al., 2010)

### **Encadré 3.3: L'objectif des 2°C : stabilisation du réchauffement à 2°C au niveau mondial par rapport aux températures préindustrielles**

La stabilisation du réchauffement à 2°C au niveau mondial par rapport aux températures préindustrielles constitue un objectif qui occupe une place de choix dans le débat public et dans les médias. Le tableau 1 résume les principales données relatives aux émissions mondiales de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre. Les points suivants sont essentiels à leur interprétation :

- Le niveau des émissions mondiales compatible avec la stabilisation de la température dépend fortement de la probabilité avec laquelle l'objectif doit être atteint, c'est-à-dire de la marge de sûreté exigée (Fischlin, 2010; Meinshausen et al. 2009). Par exemple, si l'objectif des 2°C doit être atteint avec une probabilité de 50 pour cent, 1500 Gt CO<sub>2</sub> peuvent être émises entre 2000 et 2050; mais s'il faut réaliser cet objectif avec une probabilité de 90 pour cent, la moitié seulement de cette quantité pourra être rejetée. La probabilité retenue par la suite est de 66 pour cent.
- Les émissions pour 2020 et 2050 se fondent sur des hypothèses ayant trait au développement de l'économie, de la société et des technologies. Ces hypothèses comportent des incertitudes considérables. La quantité d'émissions autorisée à long terme pour atteindre l'objectif des 2°C est limitée (voir paragraphe 3.5.2) et peut être assez bien évaluée sur la base des connaissances actuelles en matière de système climatique.
- Les émissions pour les différents pays ou groupes de pays requièrent la fixation d'hypothèses en matière de répartition des charges (voir chapitre 4).

Les engagements pris dans le monde en 2011 en matière de réductions des émissions jusqu'en 2020 (voir FCCC/TP/2011/1) ne comblent qu'un quart environ de l'écart en matière d'émissions, c'est-à-dire de la différence entre les scénarios de référence caractéristiques sans intervention (56 Gt éqCO<sub>2</sub> par an) et le niveau requis permettant d'atteindre l'objectif des 2°C (44 Gt éqCO<sub>2</sub> par an). Le respect des règles strictes et de toutes les conditions liées aux réductions ne permettrait de combler que la moitié de l'écart en matière d'émissions (49 Gt éqCO<sub>2</sub> par an).

Si l'objectif des 2°C doit être atteint par une trajectoire optimale dans l'optique actuelle, l'écart qui subsiste, de 5 à 9 Gt éqCO<sub>2</sub> par an, doit être comblé jusqu'en 2020 par des mesures supplémentaires. Pour les trajectoires d'émissions permettant d'atteindre l'objectif des 2°C avec une probabilité supérieure à 66 pour cent (scénarios verts de la figure 5), les émissions mondiales doivent arriver à leur maximum entre 2010 et 2020 avant de diminuer. Les émissions mondiales de gaz à effet de serre devraient alors passer des actuels 48 GT éqCO<sub>2</sub> par an à 44 GT éqCO<sub>2</sub> par an en 2020 et à 20 GT éqCO<sub>2</sub> par an en 2050.

Des réductions substantielles des émissions sont donc dans tous les cas impératives pour atteindre l'objectif des 2°C. Même une stabilisation à 2.5°C, voire à 3°C, nécessite d'importantes réductions des émissions d'ici la fin du siècle. Des objectifs de stabilisation au-dessous de 2°C (p. ex. l'objectif de 1.5°C demandé par quelques Etats) ne seraient atteignables probablement que moyennant un dépassement temporaire de la valeur cible de la température et des émissions cumulées permises. Dans ce cas, les émissions devraient prendre dans le futur des valeurs négatives, obtenues par exemple en retirant du CO<sub>2</sub> de l'atmosphère par l'utilisation de biomasse et la séquestration consécutive du CO<sub>2</sub>.

rios BaU présentent une tendance ascendante pour le CO<sub>2</sub> et la température à la surface du globe. Ceci indique que le réchauffement se poursuit au-delà de 2100. Par contre, les scénarios de stabilisation n'indiquent plus que de petits changements aux environs de 2100 pour différents indicateurs climatiques, tels que la température et les précipitations, ou pour la teneur en acide des eaux de surface des océans.

Dans les scénarios de stabilisation, les courbes de température s'écartent des tra-

jectoires des scénarios BaU après celle des émissions. Cela s'explique par l'inertie du système climatique. Ceci montre à quel point il importe de prendre des décisions à temps pour atteindre un objectif climatique donné. Quant aux trajectoires d'émissions les plus basses, elles correspondent à un réchauffement planétaire d'environ 2°C par rapport aux températures préindustrielles (figure 3; Washington et al. GRL, 2009). Selon les modèles économiques, ces scénarios représentent la limite inférieure du potentiel de réduction mondiale

**Tableau 1: Meilleures estimations, en équivalent de CO<sub>2</sub>, de données clés relatives aux futures émissions de CO<sub>2</sub> et d'autres gaz à effet de serre.**

### Objectifs cumulatifs

Emissions cumulées de CO<sub>2</sub> permises de 2000 à 2050 pour 2°C : 1150 Gt CO<sub>2</sub>

Emissions cumulées de gaz à effet de serre permises de 2000 à 2050 pour 2°C : 1700 Gt éqCO<sub>2</sub>

Probabilité: 66 pour cent

(Meinshausen et al., 2009)

### Emissions pour 2020 et 2050

Probabilité: 66 pour cent

(Rogelj et al., 2011, GAP 2010)

Emissions annuelles actuelles: 48 Gt éqCO<sub>2</sub>

Augmentation actuelle des émissions: presque 1 Gt éqCO<sub>2</sub> par an

Emissions de gaz à effet de serre en 2020 sans intervention: 56 Gt éqCO<sub>2</sub>

### Emissions de gaz à effet de serre en 2020 compatibles avec l'objectif de 2°C

Valeur cible: 44 Gt éqCO<sub>2</sub>

Emissions de gaz à effet de serre en 2020 en cas de réalisation de toutes les réductions promises par les pays: 53 Gt éqCO<sub>2</sub>, ou 49 Gt éqCO<sub>2</sub> en cas de mises en œuvre des règles strictes et des réductions conditionnées

### Emissions de gaz à effet de serre en 2050 compatibles avec l'objectif de 2°C

Valeur cible: 20 Gt éqCO<sub>2</sub>

Réduction en 2050 par rapport à 1990: 50 à 60 pour cent

### Réductions des émissions en pour cent

(CO<sub>2</sub> de carburants et combustibles fossiles et de sources industrielles) (IPCC, 2007)

2050 à l'échelon mondial: 50 à 85 pour cent par rapport à l'an 2000

2050 pays industrialisés: 80 à 95 pour cent par rapport à 1990

2020 pays industrialisés: 25 à 40 pour cent par rapport à 1990

2020 pays émergents: réduction substantielle (IPCC, 2007) ou de 15 à 30 pour cent (den Elzen et Höhne, 2008; den Elzen et Höhne, 2010) par rapport au scénario de référence

des émissions de gaz à effet de serre, lorsque l'on prend en considération à la fois l'inertie du système climatique et celle du système économique (Van Vuuren et al., 2008). Dans ces scénarios à basses émissions, les émissions de CO<sub>2</sub> s'écartent de l'évolution BaU entre 2015 et 2020. Ce scénario est réalisable à condition que l'on utilise à grande échelle les techniques « sans CO<sub>2</sub> » existantes; cela exige l'introduction de conditions cadres politiques, sociales et techniques fort différentes de celles en vigueur aujourd'hui ainsi que la mise en œuvre des mesures correspondantes à l'échelle du monde.

## 3.5 Conclusions

### 3.5.1 Le CO<sub>2</sub> des combustibles fossiles domine dans le réchauffement climatique actuel

Des mesures portant sur une plus longue durée et plus précises, ainsi que l'amélioration des modèles et des reconstitutions du climat historique, confirment que les émissions de CO<sub>2</sub> des combustibles et carburants fossiles ont causé la plus grande partie du réchauffement au cours du 20<sup>e</sup> siècle. Selon toute probabilité, les agents fossiles continueront à figurer comme la principale source d'émissions.

### 3.5.2 Le CO<sub>2</sub> de sources fossiles modifie le climat pour des siècles

Les émissions de CO<sub>2</sub> modifient le climat et la composition de l'atmosphère et des océans sur de très longues périodes. Le CO<sub>2</sub> des combustibles fossiles ne se dégrade que très lentement ; il s'accumule dans le système climatique et se répartit parmi l'atmosphère, les océans et la biosphère. La longévité de cette perturbation est tout à fait comparable à celle des déchets radioactifs. Une augmentation de la température due aux émissions de CO<sub>2</sub> se prolonge durant des siècles, même si les émissions sont immédiatement réduites à zéro (Solomon et al., 2009 ; Frölicher und Joos, 2010).

Les conséquences de ce comportement géochimique largement étudié et bien compris du CO<sub>2</sub> ont été déjà discutées plus haut. Les émissions doivent diminuer et tendre à long terme vers zéro pour stabiliser la concentration de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère et le réchauffement qui lui est lié. Aussi faut-il, pour atteindre un objectif climatique donné, limiter la totalité des émissions de CO<sub>2</sub>.

Le méthane, l'ozone dans la basse atmosphère, et en partie aussi des aérosols, contribuent également au réchauffement climatique (figure 1). Mais ces trois polluants atmosphériques seront plus rapidement éliminés de l'atmosphère (Forster, 2007). La stabilisation des émissions de ces trois composants suffit pour assurer celle de leurs concentrations dans la troposphère (OcCC : Le climat change, en

Suisse aussi, 2002). Alors qu'une réduction durable du réchauffement climatique anthropique n'est possible que moyennant des diminutions substantielles des émissions de CO<sub>2</sub>, un abaissement des émissions des autres gaz à effet de serre permet de fournir relativement rapidement une contribution à la stabilisation du climat (Montzka et al., 2011).

Le gaz hilarant et des composés entièrement halogénés participent aussi au réchauffement climatique. Ils se dégradent, mais ont une longue durée de vie. Les émissions de ces gaz doivent donc également baisser pour que leurs concentrations se maintiennent au niveau des valeurs actuelles.

### 3.5.3 Remettre les mesures à plus tard réduit la marge de manœuvre

Les futures émissions de CO<sub>2</sub> peuvent suivre différentes trajectoires pour atteindre un objectif de stabilisation donné (Schimel et al., 1997). La valeur cible de la température est déterminée par la totalité des émissions de CO<sub>2</sub> cumulées. Cette relation est indépendante pour l'essentiel de la trajectoire le long de laquelle les émissions sont produites (Allen et al., 2009 ; Matthews et al., 2009). La trajectoire détermine par contre l'évolution des réductions des émissions au cours du temps. Cette relation est représentée par la figure 4. Plus les émissions de CO<sub>2</sub> suivent une trajectoire de croissance (courbes rouge et noire), et plus vite le contingent à disposition se réduit. Les

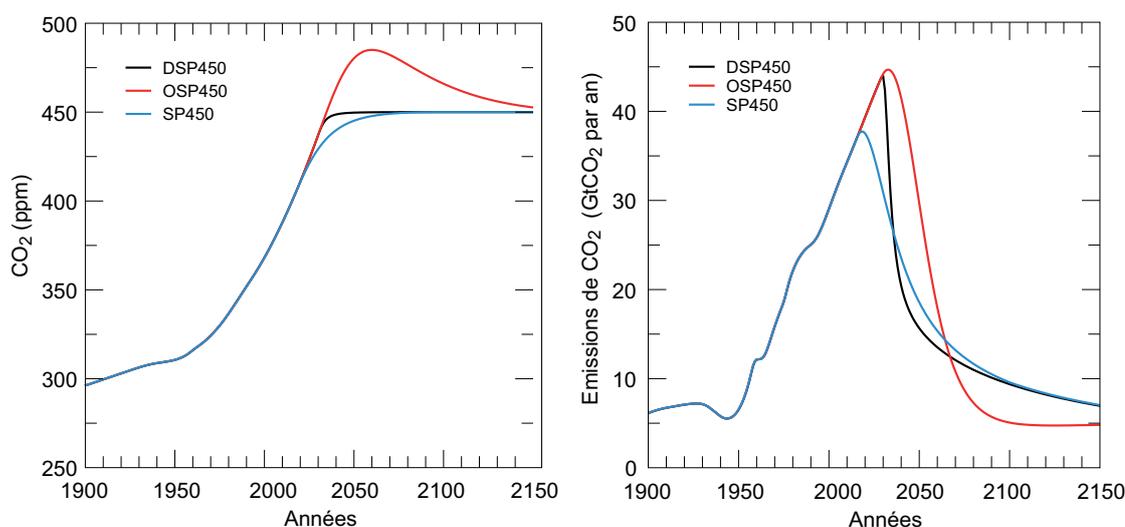


Figure 4 : Trois trajectoires possibles d'émissions, menant à une stabilisation de la concentration en CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère à 450 ppm et, partant, à une stabilisation de la température. La trajectoire bleue implique des mesures pour une réduction rapide des émissions de CO<sub>2</sub>. La trajectoire noire suit plus longtemps la tendance actuelle, et la trajectoire rouge permet que la concentration en CO<sub>2</sub> augmente temporairement au-dessus de la valeur cible. Les émissions ont été calculées à l'aide du « modèle de Berne » du cycle climat-carbone. (Joos, 2011)

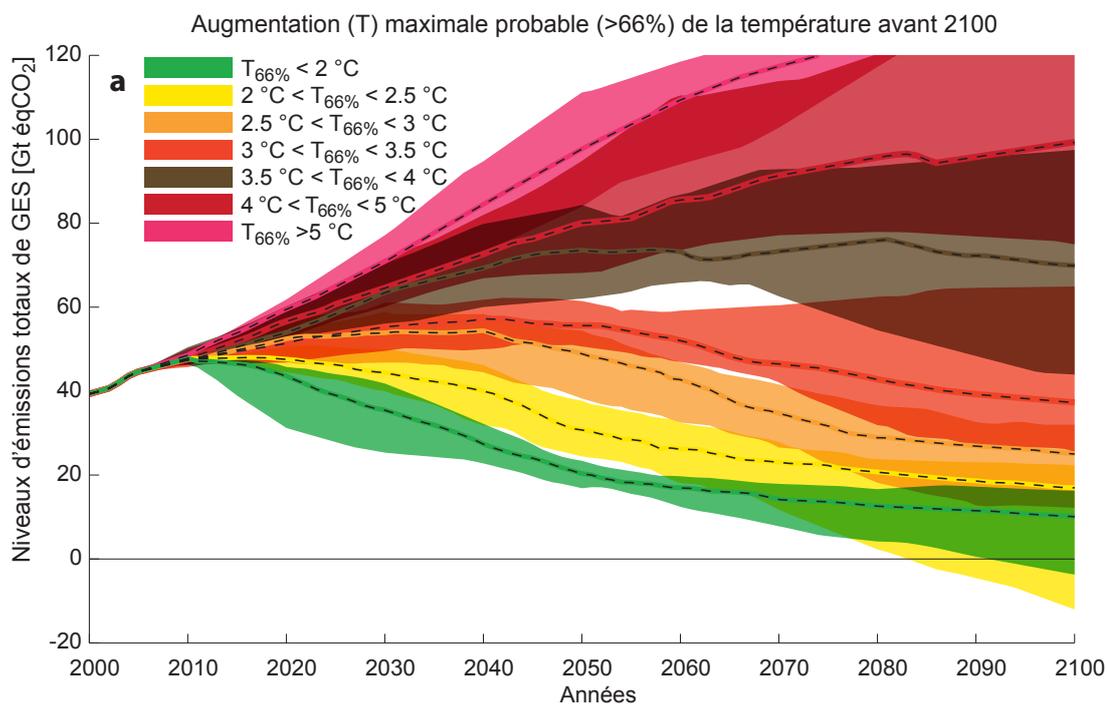


Figure 5: Émissions (en Gt eqCO<sub>2</sub>) de différentes trajectoires de modèles d'évaluation intégrée. La couleur indique quel réchauffement n'est pas dépassé avec une probabilité de plus de 66 pour cent. Les scénarios dans la bande verte sont compatibles avec l'objectif des 2°C. (Source: Rogelj et al., 2011)

émissions doivent alors baisser plus fort ultérieurement.

Le fait de suivre une trajectoire « business as usual » réduit à court terme les ajustements nécessaires à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Remettre les mesures à plus tard a toutefois pour conséquence que des dispositions plus radicales seront requises à moyen terme pour atteindre l'objectif poursuivi, faute de quoi il sera manqué. Passer rapidement d'une hausse à une baisse des émissions accroît les coûts de reconversion vers des technologies libres de CO<sub>2</sub>.

Le renvoi des mesures conduit de plus à l'apparition de nouveaux risques (Schimel et al., 1997): une augmentation des émissions pendant les prochaines années, accompagnée de changements climatiques rapides pourrait affaiblir les océans et la biosphère terrestre dans leur fonction de puits de CO<sub>2</sub>. Il faudra dans ce cas réduire encore davantage les émissions pour atteindre l'objectif visé.

### 3.5.4 Conséquences pour la politique climatique

La réduction des émissions de gaz à effet de serre permet de stabiliser le réchauffement. Les émissions de CO<sub>2</sub> de sources fossiles surtout sont en point de mire. Plus tôt des mesures seront prises à leur égard, plus large sera la marge de manœuvre disponible à l'avenir.

La trajectoire actuelle des émissions en constante hausse est loin d'être compatible avec l'objectif souvent cité d'un réchauffement planétaire de 2°C au maximum. La réduction des émissions de 20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990, à laquelle la Suisse et l'UE aspirent, est probablement insuffisante pour atteindre l'objectif des 2°C (voir encadré 3.3). Pour le réaliser, il faudrait réduire les émissions dans le monde entier encore bien davantage que planifié et promis jusqu'ici.

La longue persistance du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, ainsi que l'inertie des systèmes climatique et économique, nécessitent des prises de décisions précoces afin d'atteindre des objectifs climatiques spécifiques.

## Bibliographie

- Allen M. R., Frame D. J., Huntingford C., Jones C. D., Lowe J. A., Meinshausen M. & Meinshausen N. (2009), Warming caused by cumulative carbon emissions towards the trillionth tonne; *Nature* 458, Vol. 30, pp. 1163–1166.
- Caldeira, K., and M. E. Wickett (2003), Anthropogenic carbon and ocean pH, *Nature*, 425, 365–365.
- den Elzen M. and Höhne N. (2008), Reductions of greenhouse gas emissions in Annex I and non-Annex I countries for meeting concentration stabilisation targets; *Climatic Change*, 91 : 249–274
- Doney, S. C., V. J. Fabry, R. A. Feely, and J. A. Kleypas (2009), Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem, *Annu Rev Mar Sci*, 1, 169–192.
- den Elzen M. and Höhne N. (2010), Sharing the reduction effort to limit global warming to 2 °C. In: *Climate Policy*, 10, pp. 247–260.
- Edmonds, J., F. Joos, N. Nakicenovic, R. G. Richels, and J. L. Sarmiento (2004), Scenarios, Targets, Gaps and Costs., in *The Global Carbon Cycle: Integrating Humans, Climate and the Natural World*, edited by C. B. Field and M. R. Raupach, pp. 77–102, Island Press, Washington DC, USA.
- Forster, P., et al. (2007), Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing, in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, pp. 129–234, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA, New York, NY, USA.
- Frank, D. C., J. Esper, C. C. Raible, U. Büntgen, V. Trouet, B. Stocker, and F. Joos (2010), Ensemble reconstruction constraints of the global carbon cycle sensitivity to climate, *Nature*, 463, 527–530.
- Frölicher, T. L. and Joos F. (2010), Reversible and irreversible impacts of greenhouse gas emissions in multi-century projections with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model, *Climate Dynamics*, 35/7-8, pp. 1439–1459.
- Houghton, R. A. (2008), Carbon Flux to the Atmosphere from Land-Use Changes: 1850–2005, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Huber, M. and Knutti R. (2011), Anthropogenic and natural warming inferred from changes in Earth's energy balance, *Nature Geoscience*, published online, doi: 10.1038/NGEO1327; printed: *Nature Geoscience* 5, 31–36 (2012)
- IPCC (2007a), Summary for Policy Makers (WG I), in *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, M. Tignor and H. L. Miller, pp. 1–18, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA.
- IPCC (2007b), Summary for Policy Makers (WG III), in *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by B. Metz, O. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave and L. A. Meyer, pp. 1–23, Cambridge University Press, Cambridge United Kingdom and New York, NY, USA.
- Joos, F., and R. Spahni (2008), Rates of change in natural and anthropogenic radiative forcing over the past 20 000 years, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(5), 1425–1430.
- Joos, F., T. L. Frölicher, M. Steinacher, and G.-K. Plattner (2011), Impact of climate change mitigation on ocean acidification projections, in *Ocean Acidification*, edited by J. P. Gattuso and L. Hansson, pp. 273–289, Oxford University Press, Oxford.
- Jungbluth N., Steiner R., and Frischknecht. R. (2007), Graue Treibhausgas-Emissionen der Schweiz 1990–2004. Erweiterte und aktualisierte BilanzRep., 150 pp.
- Lüthi, D., et al. (2008), High-resolution carbon dioxide concentration record 650 000–800 000 years before present, *Science*, 453, 379–382.
- Marland, G., T. A. Boden, and R. J. Andres (2008), Global, Regional, and National CO<sub>2</sub> Emissions, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- Matthews H. D., Gillett N. P., Stott P. A. and Zickfeld K. (2009), The proportionality of global warming to cumulative carbon emissions; *Nature* 459, pp. 829–832.
- Meinshausen M., Meinshausen N., Hare W., Raper S. C. B., Frieler K., Knutti R., Frame D. and Allen M. R. (2009), Greenhouse gas emission targets for limiting global warming to 2 °C; *Nature* 458, 1158–1162, 30 April 2009 | doi: 10.1038/nature08017

- Montzka, S. A., E. J. Dlugokencky, and J. H. Butler (2011), Non-CO<sub>2</sub> greenhouse gases and climate change, *Nature*, 476(7358), 43–50.
- Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A. et al. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747–56.
- Nakicenovic, N. (2000), *Special Report on Emissions Scenarios*, Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press New York.
- OcCC (2007), *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 – Impacts attendus sur l’environnement, la société et l’économie*. ISBN 978-3-907630-27-3, OcCC (Organe consultatif sur les changements climatiques) et ProClim, Berne, 172 pp.
- OcCC (2008), *Le climat change – que faire? Le nouveau rapport des Nations Unies sur le climat (GIEC 2007) et ses principaux résultats dans l’optique de la Suisse*. ISBN : 978-3-907630-34-1, OcCC – Organe consultatif sur les changements climatiques, Berne, 47 pp.
- Rogelj J., Hare W., Lowe J., van Vuuren D. P., Riahi K., Matthews B., Hanaoka T., Jiang K. and Meinshausen M. (2011), Emission pathways consistent with a 2 °C global temperature limit; *Nature Climate Change* 1, pp. 413–418, doi: 10.1038/nclimate1258
- Schimmel, D., M. Grubb, F. Joos, R. K. Kaufmann, R. Moos, W. Ogana, R. Richels, and T. Wigley (1997), IPCC Technical Paper III. Stabilisation of atmospheric greenhouse gases: physical, biological, and socio-economic implications, 53 pp., Intergovernmental Panel on Climate Change.
- Siegenthaler, U., and H. Oeschger (1978), Predicting future atmospheric carbon dioxide levels, *Science*, 199, 388–395.
- Smith, S. J., J. van Aardenne, Z. Klimont, R. J. Andres, A. Volke, and S. Delgado Arias (2011), Anthropogenic sulfur dioxide emissions: 1850–2005, *Atmos. Chem. Phys.*, 11(3), 1101–1116.
- Solomon S., Plattner G-K., Knutti R. and Friedlingstein P. (2009), Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions; *PNAS* February 10, 2009 vol. 106 no. 6, pp. 1704–1709.
- Steinacher, M., F. Joos, T. L. Frölicher, G.-K. Plattner, and S. C. Doney (2009), Imminent ocean acidification in the Arctic projected with the NCAR global coupled carbon cycle-climate model, *Biogeosciences*, 6, 515–533.
- Steven J. Davis, Caldeira K. and Damon Matthews H. (2010), Future CO<sub>2</sub> Emissions and Climate Change from Existing Energy Infrastructure, *Science*, 10 September 2010: Vol. 329 no. 5997 pp. 1330–1333; DOI: 10.1126/science.1188566
- Stocker, B. D., Strassmann K. and Joos F. (2011), «Sensitivity of Holocene atmospheric CO<sub>2</sub> and the modern carbon budget to early human land use: analyses with a process-based model», *Biogeosciences*, 8/1, pp. 69–88.
- Strassmann, K. M., G. K. Plattner, and F. Joos (2009), CO<sub>2</sub> and non-CO<sub>2</sub> radiative forcing agents in twenty-first century climate change mitigation scenarios, *Climate Dynamics*, 33, 737–749.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2011), *Bridging the emissions gap. A UNEP Synthesis Report*.
- Van Vuuren, D. P., et al. (2008), Temperature increase of 21st century mitigation scenarios, *Proc Natl Acad Sci USA*, 105, 15258–15262.
- Washington W. M., Knutti R., Meehl G. A., Teng H., Tebaldi C., Lawrence D., Buja L. and Strand W. G. (2009), How much climate change can be avoided by mitigation? *Geophys. Res. Lett.* 36 L08703.
- Weyant, J. R., F. C. de la Chesnaye, and G. J. Blanford (2006), Overview of emf21: Multigas mitigation and climate policy, *Energy Journal*, 27, 1–32.

## 4 Objectifs de politique climatique pour la Suisse

### Philippe Thalmann

ENAC INTER REME, Recherches en Economie et Management de l'Environnement (REME), EPF Lausanne, Station 16, CH-1015 Lausanne; philippe.thalmann@epfl.ch

- La communauté internationale est loin d'un accord sur la question de savoir quel devrait être le budget mondial des émissions et comment il pourrait être réparti équitablement entre les Etats.
- Partant des recommandations des scientifiques sur la manière de répartir équitablement un budget mondial des émissions, un objectif relativement robuste peut être calculé pour la Suisse à l'échéance de 2020: ses émissions de gaz à effet de serre devraient baisser jusque-là de 20 pour cent par rapport à 1990.
- A plus long terme, les recommandations divergent. Il y a cependant de bonnes raisons de penser qu'un pays riche tel que la Suisse ne devrait plus émettre du tout de gaz à effet de serre à partir du milieu du 21<sup>e</sup> siècle.
- Dans le passé, la Suisse a défini ses objectifs de politique énergétique et climatique indépendamment du cours des négociations internationales et de raisons d'équité et peut aussi agir de cette manière à l'avenir.
- Il est de l'intérêt du pays de renoncer à moyen terme aux supports énergétiques fossiles.
- Des objectifs aisés à communiquer (société à 2000 watts, société à 1 tonne de CO<sub>2</sub>, neutralité climatique) sont judicieux du point de vue politique.

La Suisse a stabilisé ses émissions de gaz à effet de serre par une multitude de dispositions dans presque tous les domaines politiques. Cette approche fournit aussi la clé permettant de traiter les conflits d'objectifs d'une politique climatique ambitieuse: la surcharge éventuelle de personnes et entreprises individuelles peut être compensée en recourant à d'autres instruments.

### 4.1 Introduction

La recherche climatologique montre qu'un budget mondial contraignant en matière d'émissions de gaz à effet de serre est une condition nécessaire si l'on veut empêcher que le réchauffement climatique ne constitue un risque toujours plus grand pour l'être humain. De quelle manière les diverses émissions de gaz à effet de serre dépendent les unes des autres, comment leur concentration dans l'atmosphère se développera, et quelles conséquences il en résultera pour le climat et pour l'humanité, tout ceci ne peut être évalué aujourd'hui qu'avec de grandes incertitudes. C'est pourquoi l'on peut tout au plus indiquer dans quelle fourchette se situe le budget des émissions dont on dispose encore ces prochaines décennies au niveau mondial si l'on entend limiter le réchauffement climatique. Il est clair que les risques climatiques augmenteront massivement si les émissions mondiales de gaz à effet de serre continuent de croître dans les mêmes conditions que jusqu'ici (business as usual). En

revanche, une réduction mondiale des émissions diminuerait les risques.

Un budget mondial des émissions définit un volume total des émissions provenant de toutes les sources de gaz à effet de serre dans tous les pays du monde, et ce au moins jusqu'à la fin du siècle. Pour qu'un tel budget puisse guider la politique climatique partout dans le monde, c'est-à-dire pour qu'il permette de définir des objectifs d'émission pour les années et décennies à venir, il devrait être clairement fixé et réparti dans le temps, en dépit des incertitudes (voir paragraphe 3.4 / encadré 3.3). De nouvelles données pourraient néanmoins susciter des ajustements au fil des ans.

En principe, un même budget mondial peut être respecté de différentes manières: soit l'on réduit immédiatement les émissions, soit l'on tolère qu'elles augmentent encore quelques années avant de les abaisser d'autant plus fort. Mais plus on attend, plus les réductions ultérieures devront être radicales (voir paragraphe 3.5.3). Au premier abord, il paraît

raisonnable de procéder immédiatement à des réductions. On peut néanmoins invoquer de bonnes raisons de les repousser à plus tard. D'abord, leur ajournement permet d'adapter progressivement les infrastructures existantes et de profiter des innovations technologiques prévisibles. Ensuite, il est vraisemblable que les générations futures, notamment dans les pays en développement, auront un meilleur standard de vie à l'avenir et donc plus de facilité à mettre en œuvre les mesures nécessaires de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Les économistes calculent l'évolution optimale des émissions de gaz à effet de serre compatible avec un budget donné en tenant compte des coûts actuels et futurs des réductions d'émissions. Cette évolution dépend de paramètres difficiles à prévoir, tels que le progrès technique, les réserves d'énergies fossiles et le développement démographique et économique.

Mais différer les mesures de réduction fait porter aux générations futures des risques difficiles à évaluer. C'est ainsi que le CO<sub>2</sub> émis à notre échelle de temps restera stocké dans le système de la Terre tant qu'aucune technologie ne permettra de le retirer de l'atmosphère. En outre, la marge de manœuvre des générations à venir se rétrécira si nous remettons des mesures de réduction à plus tard. Selon le Conseil mondial du climat (GIEC), les inconnues sont encore si grandes qu'il n'est guère possible d'obtenir un consensus sur ce que devrait être l'évolution optimale des émissions (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, GIEC/IPCC, 2007).<sup>1</sup>

Une fois qu'un budget mondial des émissions est défini et que l'on s'est mis d'accord sur un plan permettant de s'y tenir, l'étape suivante consiste à répartir entre tous les pays du monde les droits d'émissions annuels prévus selon ce plan. Ceci permettrait d'aboutir à des objectifs d'émission à court, moyen et long terme pour la Suisse. Ces objectifs d'émission deviennent des objectifs de réduction si on les exprime en pourcentage des émissions d'une année de référence (normalement 1990) ou comme part d'une évolution «business as usual».

La répartition du budget annuel des émissions entre les pays du monde peut s'appuyer

sur différents critères qui sont exposés au paragraphe 4.2 (voir aussi Philibert, 2005). La répartition du budget des émissions constitue l'un des principaux enjeux des négociations internationales en cours. Dans le cadre du Protocole de Kyoto, la communauté internationale a arrêté que seuls les pays industrialisés sont astreints à des budgets contraignants, tandis que les pays en développement et émergents sont exemptés jusqu'en 2013 de tout effort de réduction. La raison en était que l'on devait donner à ces pays l'occasion d'atteindre un niveau de bien-être matériel suffisant avant de leur imposer des sacrifices. Cette argumentation est en accord avec le point de vue selon lequel il peut être pertinent de différer les mesures de réduction des émissions.

Ces dernières années, il s'est révélé toutefois que de grands pays comme la Chine et l'Inde entamaient massivement le budget mondial. Si cette évolution se poursuit jusqu'à ce que l'immense population de ces pays ait atteint un niveau de bien-être matériel comparable à celui des pays industrialisés, le budget mondial compatible avec une stabilisation du changement climatique anthropique sera en grande partie épuisé. C'est pourquoi il est indispensable que les pays émergents commencent aussi de freiner leurs émissions. Ceci implique qu'ils se détournent de l'utilisation d'énergie fossile bon marché dont d'autres pays ont encore profité pour leur essor économique. Il est probable que des pays comme la Chine et l'Inde ne consentiront pas sans autre à un tel sacrifice, à moins que les pays industrialisés ne leur apportent un soutien massif.

Il sera très difficile de répartir le budget annuel des émissions de manière à ce que tous les pays considèrent ce partage comme équitable et le respectent. De plus, les grandes incertitudes relatives au budget annuel et au budget mondial compliquent la répartition. Dans ce contexte, on peut douter qu'une référence faisant autorité puisse voir le jour pour guider la politique climatique des différents pays.

A ceci s'ajoute pour la Suisse le fait que ses émissions présentes et futures ne représentent que quelques pour mille des émissions mondiales de gaz à effet de serre et n'ont donc pas d'effets perceptibles sur le climat. Il est donc tentant pour la Suisse de renoncer aux calculs

<sup>1</sup> « Les résultats, peu nombreux et de portée limitée, des analyses intégrées des coûts et avantages des mesures d'atténuation indiquent que si ces derniers sont, dans l'ensemble, comparables en ampleur, ils ne permettent toutefois pas encore de déterminer avec certitude les modes d'émission ou le niveau de stabilisation pour lesquels les avantages excèderaient les coûts » (p. 20).

complexes et controversés censés déterminer sa part équitable au budget mondial et de fonder les objectifs de sa politique climatiques sur d'autres bases. Le paragraphe 4.3 examine cette approche et propose des objectifs possibles.

Il appartient à la population et à ses représentants de fixer les objectifs climatiques, pas aux scientifiques. Ceux-ci ont pour tâche de fournir les bases nécessaires à l'appréciation des choix possibles. Elles sont données aux chapitres 2 et 3, qui exposent les défis climatiques. Le paragraphe 4.4 est consacré aux principaux critères applicables à la définition d'un objectif climatique. Le chapitre 5 présente des évaluations des coûts de réductions des émissions en Suisse.

## 4.2 Une contribution équitable aux efforts mondiaux

Admettons que la Suisse veuille fixer ses objectifs de politique climatique de manière à participer équitablement aux efforts requis au niveau international : comment définir cette juste part ?

En principe, trois options se présentent pour la Suisse :

1. Elle peut attendre jusqu'à ce que la communauté internationale se soit entendue sur une répartition du budget annuel et accepter la part qui lui sera assignée. Celle-ci pourrait être déduite des efforts de réduction fixés par négociations pour un groupe de pays, par exemple l'Europe. Une autre possibilité consiste à s'entendre sur un critère équitable, comme par exemple les émissions par habitant, qui permettrait à la Suisse de calculer elle-même sa part.
2. La Suisse peut définir elle-même une répartition équitable et se tenir à sa part des efforts, même si le reste du monde ne suit pas.
3. Elle peut s'aligner sur les efforts consentis par des pays ou groupes de pays comparables, par exemple l'Union européenne. C'est ce qu'a fait la Suisse dans le cadre du Protocole de Kyoto.

Les négociations internationales en cours sont encore très loin d'une entente sur le budget mondial et encore plus loin d'un consensus au sujet de sa répartition équitable. Aussi la solution 1 n'entre-t-elle pas en ligne de compte à court terme comme fil conducteur de la politique climatique suisse. Dans la suite, le présent rapport se concentre donc sur les solutions 2 et 3 et met en évidence quels objectifs concrets ces deux variantes présupposent. Il reprend à cet égard les principes les plus importants adoptés lors des négociations internationales.

### 4.2.1 Critères pour définir une contribution équitable

En 1990, les émissions mondiales de gaz à effet de serre se montaient à 38 milliards de tonnes de CO<sub>2</sub> (Gt éqCO<sub>2</sub>) (UNEP, 2010). En 2005, elles atteignaient 45 Gt éqCO<sub>2</sub>, et les experts attendent pour 2020 des émissions de 56 Gt éqCO<sub>2</sub> si aucune mesure additionnelle n'est prise («business as usual»). Ils estiment également que les émissions devraient atteindre leur maximum en 2015 et descendre au-dessous de 44 Gt CO<sub>2</sub> d'ici 2020 pour avoir une probabilité de plus de 66 pour cent que la température du globe n'augmente pas de plus de 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle. Les émissions devraient ensuite continuer de diminuer rapidement, pour baisser au-dessous de 20 Gt CO<sub>2</sub> jusqu'en 2050 et s'approcher de zéro vers la fin du siècle.

La réduction requise jusqu'en 2020 peut être exprimée de différentes manières : les émissions mondiales ne doivent pas augmenter de plus de 16 pour cent par rapport à 1990 ; elles ne doivent pas dépasser la valeur de 2004 ; elles doivent diminuer de 20 pour cent par rapport au scénario «business as usual». Appliqués à la Suisse, ces objectifs seraient confortables, car les émissions de gaz à effet de serre de ce pays oscillent depuis 1990 autour d'un niveau constant de 53 millions de tonnes. Une telle approche serait toutefois en contradiction avec la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC), adoptée en 1992, signée par 192 pays et ratifiée en 1993 par l'Assemblée nationale suisse.<sup>2</sup> La CCNUCC prévoit en effet des efforts plus importants de la part des pays développés. Ceci est stipulé à l'article 3 : «Il incombe aux Parties de préserver le système climatique dans l'intérêt des

<sup>2</sup> La CCNUCC ne contient pas de valeurs chiffrées ou de calendrier au sujet des niveaux de concentration des gaz à effet de serre à ne pas dépasser, ni même de véritable obligation pour les pays industrialisés de réduire leurs émissions de ces gaz. La CCNUCC énonce seulement les grands principes de la lutte contre le réchauffement planétaire et laisse une grande latitude quant à leur mise en œuvre.

générations présentes et futures, sur la base de l'équité et en fonction de leurs responsabilités communes mais différenciées et de leurs capacités respectives. Il appartient, en conséquence, aux pays développés parties d'être à l'avant-garde de la lutte contre les changements climatiques et leurs effets néfastes.» L'article 4 précise que les politiques et mesures adoptées par les Parties tiendront compte « des différences entre ces Parties quant à leur point de départ et à leur approche, à leur structure économique et à leur base de ressources, de la nécessité de maintenir une croissance économique forte et durable, des technologies disponibles et des autres circonstances propres à chaque cas, ainsi que de la nécessité pour chacune de ces Parties de contribuer de façon adéquate et équitable à l'action mondiale entreprise pour atteindre cet objectif. »

Il est difficile de déduire de ces critères un objectif de réduction des émissions pour un pays donné. Mais c'est exactement cela qui a été fait dans le cas du Protocole de Kyoto pour les années 2008 à 2012.<sup>3</sup> Les pays émergents et en développement sont restés libres de toute restriction, tandis que les pays développés de l'annexe I de la CCNUCC ont été appelés à abaisser leurs émissions de 5.2 pour cent par rapport à 1990. Cet objectif a été réparti entre les pays de l'annexe B du Protocole de Kyoto. Toutefois, cette répartition est bien plus le résultat de négociations politiques que fondée sur des critères objectifs. C'est ainsi que la Suisse s'est alignée sur la valeur moyenne acceptée par les pays de l'Europe des Quinze, soit une réduction des émissions de 8 pour cent. Cette décision ne repose pas sur une comparaison approfondie de la situation de l'UE et de la Suisse.

#### 4.2.2 Alignement sur d'autres pays

L'objectif global de 8 pour cent pour l'Europe des Quinze a été réparti entre les Etats membres en fonction de leur niveau de développement économique, de leur intensité en CO<sub>2</sub> et de leur capacité à réduire les émissions. Les objectifs par Etats varient entre une réduction de 28 pour cent pour le Luxembourg et une augmentation de 27 pour cent pour le Portugal. Un objectif de réduction de 13 pour cent a été fixé pour l'Autriche. Avec une réduction de 8 pour cent, la Suisse se situe au niveau de la Belgique, à laquelle un objectif de 7.5 pour

cent a été attribué, de l'Italie (6.5 pour cent) et des Pays-Bas (6 pour cent).

Dans l'hypothèse fondée que la Suisse ait la possibilité de réduire ses émissions de gaz à effet de serre selon l'article 4 de la CCNUCC autant que la moyenne de l'UE, voire davantage, elle devrait continuer de se rallier à l'objectif commun de l'UE. Celle-ci s'est engagée à abaisser la totalité de ses émissions de gaz à effet de serre de 20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990, ou même de 30 pour cent si d'autres pays développés faisaient de même (objectif «20-30»). L'UE s'est engagée en outre de couvrir 20 pour cent de ses besoins en énergie par des ressources renouvelables et d'abaisser sa consommation d'énergie primaire de 20 pour cent par des améliorations de son efficacité énergétique. On parle à ce sujet parfois des « objectifs 20-20-20 » (Commission européenne, 2010, p. 3). Pour 2050, la Commission européenne souhaite une « économie sobre en carbone », impliquant une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 80 à 95 pour cent.

L'objectif 20-30 de l'UE pour la réduction des gaz à effet de serre jusqu'en 2020 a été repris par le Conseil fédéral comme engagement de la Suisse dans le cadre de l'accord de Copenhague et intégré à la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>. Dans l'esprit de la CCNUCC, l'objectif de réduction devrait être fixé en comparant l'état de développement économique, l'intensité en CO<sub>2</sub> et la capacité de la Suisse à réduire ses émissions avec les données correspondantes des pays de l'UE. Une estimation en ce sens conclut que l'objectif équitable pour la Suisse se situe aux environs de 25 pour cent (Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL), 2009, p. 31).

Quelle serait la part de la Suisse à l'objectif des 20 pour cent si elle était membre de l'UE et se voyait appliquer la règle de répartition entre les pays prévue par l'UE? L'UE fait la distinction entre les producteurs d'énergie et autres grands émetteurs de CO<sub>2</sub> soumis au système communautaire d'échange de quotas d'émission (SCEQE; en anglais: Emission Trading System EU-ETS) d'une part, et les autres secteurs non soumis d'autre part, et calcule les efforts de réduction par rapport à 2005. Les émetteurs soumis au SCEQE doivent abaisser leurs émissions de 21 pour cent par rapport à 2005, les autres de 10 pour cent. Cet

<sup>3</sup> Adopté à l'unanimité en 1997, le Protocole de Kyoto est entré en vigueur le 16 février 2005. Il précise et renforce la CCNUCC de manière significative en appelant les pays développés à poursuivre des objectifs quantifiés – et juridiquement contraignants – de réduction ou limitation de leurs émissions de gaz à effet de serre. En revanche, il ne contient aucune obligation pour les pays en développement.

objectif de 10 pour cent est ventilé entre les pays membres entre 20 et +20 pour cent en fonction de leur PIB par habitant. La Suisse fait partie des pays les plus riches et serait donc astreinte à un objectif de réduction de 20 pour cent. L'objectif global de la Suisse pour les grands émetteurs (p.ex. l'industrie du ciment) et les autres secteurs serait une réduction d'environ 20 pour cent par rapport à 2005, soit de 18 pour cent en comparaison du niveau de 1990.

Entre-temps, plusieurs pays de l'UE ont annoncé des objectifs plus ambitieux. Ainsi, l'Allemagne aimerait abaisser ses émissions de gaz à effet de serre de 40 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990. Par sa loi de 2008 sur le changement climatique, la Grande-Bretagne s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 80 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à 1990 et a fixé un objectif à moyen terme d'au moins 34 pour cent jusqu'en 2020. A la suite du forum «Grenelle Environnement», la France s'est donné pour objectif de diminuer ses émissions de gaz à effet de serre de 22.8 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990, et de 75 pour cent jusqu'en 2050. Les Pays-Bas et la Norvège aspirent à une réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de 30 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à leurs émissions respectives de 1990, la Suède même de 40 pour cent. La Norvège, qui n'est pas membre de l'UE, et la Suède aspirent à atteindre la neutralité climatique au plus tard en 2050, voire plus tôt si d'autres pays suivent leur exemple.

#### 4.2.3 Un budget des émissions équitable

Si la Suisse ne veut pas simplement reprendre les objectifs européens, mais calculer elle-même sa part équitable aux réductions nécessaires ou au budget mondial des émissions, elle peut le faire sur la base de différentes considérations, exposées brièvement ci-dessous.

Une première règle simple de répartition a été proposée par le «Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen» (Conseil scientifique du gouvernement allemand pour les changements environnementaux globaux) (WGBU, 2009). Selon cette règle, chaque pays se voit attribuer un budget des émissions proportionnel à sa population actuelle. Le WGBU évalue le budget mondial des émissions pour la période de 2010 à 2050 à 750 Gt CO<sub>2</sub> d'origine fossile. Ce budget ne doit pas être dépassé si l'on entend limiter, avec une probabilité de 66 pour cent, l'élévation de la température au niveau planétaire à 2 °C par rapport à l'ère préindustrielle (WGBU, 2009). Pour une population mondiale de 6.9 milliards d'êtres humains, cela signifie un budget moyen de 2.7 tonnes de CO<sub>2</sub> par habitant et année pendant les quarante prochaines années. La Suisse a émis en 2011 quelque 38 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> d'origine fossile. Pour 7.9 millions d'habitants, cela a fait 4.8 tonnes de CO<sub>2</sub> par personne, soit un peu moins du double du budget. En fonction de sa population, la Suisse disposerait d'un budget de 840 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Elle pourrait atteindre l'objectif conforme à ce budget en diminuant ses émissions chaque année de 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> (figure 1). Ses émissions seraient

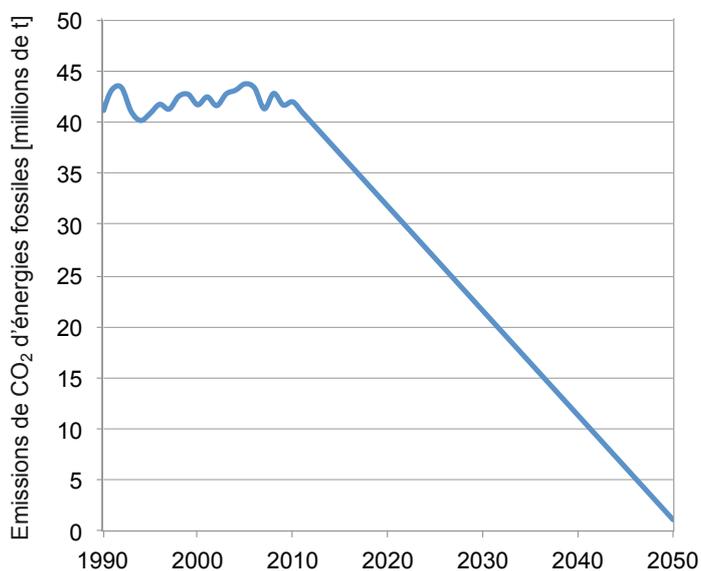


Figure 1 : Une évolution des émissions de CO<sub>2</sub> de la Suisse, qui serait compatible avec un budget des émissions de 840 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> pour la période de 2010 à 2050.

alors 23 pour cent au-dessous du niveau de 1990 en 2020 et deviendraient nulles en 2051.

Les pays en développement préconisent en général une répartition du budget des émissions proportionnel à la population. Les pays industrialisés, qui craignent un fardeau excessif, préfèrent une répartition qui tienne compte de niveaux antérieurs des émissions (Grandfathering). Les objectifs quantitatifs du Protocole de Kyoto sont ainsi formulés par rapport aux émissions de 1990. Un compromis entre le critère de la population et le critère des niveaux antérieurs des émissions exigerait que tous les pays, dont les niveaux d'émissions par habitant sont très différents, convergent vers un niveau commun. Le Global Commons Institute a élaboré une proposition intitulée «Contraction and Convergence». Celle-ci a été très bien accueillie dans les négociations internationales et a eu un fort impact sur la politique climatique de la Grande-Bretagne.

Pour un objectif de réduction des émissions mondiales de gaz à effet de serre de 90 pour cent jusqu'en 2080 et une convergence des émissions par habitant jusqu'en 2050, le niveau commun se situerait vers 0.6 tonnes  $\text{eqCO}_2$ . Les pays en développement auraient encore pendant quelques années le droit d'accroître leurs émissions par habitant, tandis que les pays industrialisés devraient tout de suite diminuer les leurs. Pour la Suisse, passer de 6.7 tonnes  $\text{eqCO}_2$  en 2009, à 0.6 tonnes  $\text{eqCO}_2$  jusqu'en 2050, représente une réduction de 0.15 tonnes  $\text{eqCO}_2$  par an. Compte tenu de la croissance démographique probable, cela signifie une diminution des émissions de gaz à effet de serre de 20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990, et de 90 pour cent jusqu'en 2050.

Avec une argumentation analogue, l'Energy Science Center de l'EPF de Zurich a formulé en 2008 l'objectif de 1 tonne de  $\text{CO}_2$  par an et habitant jusqu'à la fin du siècle. Cet objectif concilie la protection du climat avec un approvisionnement énergétique suffisant, en ne visant pas seulement une réduction de la consommation d'énergie, mais en misant en même temps sur les énergies renouvelables.

L'association économique swisscleantech a le même objectif en vue dans sa stratégie énergétique (2011), mais pour 2050 déjà. L'objectif de 1 tonne de  $\text{CO}_2$  par an et habitant en 2050 est aussi fixé dans plusieurs lois cantonales et communales.<sup>4</sup>

#### 4.2.4 Pollueur-payeur et capacité de payer

L'exigence d'un budget des émissions proportionnel à la population peut sembler exigeante, quand bien même elle ne tient pas compte des émissions de chaque pays depuis la révolution industrielle. Les pays industrialisés sont les principaux responsables de la concentration actuelle de gaz à effet de serre, alors que les pays moins développés ont peu contribué à ce que le budget des émissions qui reste à disposition de la planète pour les temps à venir soit si maigre. Le principe du pollueur-payeur impliquerait donc que les pays industrialisés aient à disposition une part réduite du budget mondial futur.

A noter aussi que l'exigence susmentionnée ne prend pas en considération la capacité de chaque pays à réduire ses émissions. Elle répartit le budget des émissions encore juste supportable entre les pays du monde sans prêter attention au fardeau imposé ainsi à chacun d'eux. Dans l'optique actuelle, il semble peu pertinent de donner plus de poids à la juste répartition du budget qu'au fardeau équitable lié à la réduction des émissions. Ce sont plutôt des considérations pratiques qui favorisent la première option. Pour juger objectivement du partage équitable du fardeau, il faudrait prendre en compte les mesures mises en œuvre concrètement durant des décennies pour atteindre l'objectif d'émission. Les scientifiques qui proposent des règles pour un partage équitable du fardeau recourent à des modèles de simulation économique sophistiqués. Ceci implique des règles très complexes. D'autre part, l'approche axée sur le fardeau permet d'intégrer des transactions monétaires entre les pays, notamment lorsque des pays industrialisés financent des mesures de réduction dans des pays en développement.

Sur la base des considérations qui précèdent, la part équitable de la Suisse aux efforts mondiaux peut être calculée en tenant compte des émissions passées du pays et de la capacité économique de ce dernier. Ceci conduirait à un objectif de réduction extrêmement ambitieux pour le Suisse. Pour empêcher un réchauffement planétaire de plus de 2 °C, les émissions mondiales de gaz à effet de serre devraient baisser de 80 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à 1990. Ceci impliquerait une réduction de 18 milliards de tonnes  $\text{eqCO}_2$  jusqu'en 2020.

<sup>4</sup> Ainsi, les habitants de la ville de Zurich ont accepté en 2008 en votation populaire d'inscrire cet objectif dans le règlement communal.

La part équitable de la Suisse à cette réduction, tenant compte du revenu de la population et des émissions depuis 1990, est de 0.37 pour cent (Athanasiou et al., 2009). Ce pourcentage signifie que la Suisse devrait abaisser ses émissions de 130 pour cent par rapport à 1990! Une telle diminution ne peut manifestement pas être obtenue à l'intérieur d'un pays, mais doit être atteinte en grande partie en finançant des réductions des émissions dans les pays en développement.

### 4.3 Objectifs climatiques autonomes

Assigner les objectifs de réduction de façon équitable est difficile et une décision en ce sens de la communauté internationale n'est pas encore en vue. La Suisse doit continuer de participer activement à la recherche d'une solution internationale et le fera. Mais jusqu'à ce qu'un consensus international soit trouvé, elle devrait se fixer un objectif climatique autonome, qui ne soit pas forcément axé sur une perspective incertaine d'équité. Elle renforcera ainsi sa position dans les négociations et agira comme exemple pour des objectifs de même nature. Il convient à cet égard de procéder de façon pragmatique. Que font les autres pays? Qu'a-t-on fait par le passé? Quel sont les objectifs aisés à communiquer? Le présent document commente ci-dessous les anciens objectifs de la politique climatique suisse ainsi que les propositions pour l'avenir.

#### 4.3.1 Objectifs historiques

La stratégie suisse de lutte contre le réchauffement climatique consiste en une combinaison de dispositions à différents niveaux et dans divers domaines.

##### a) La loi sur l'énergie, Energie 2000 et SuisseEnergie

Dans le cadre du programme Energie 2000, lancé en 1990, la Suisse s'est fixé pour objectif de diminuer sa dépendance aux importations d'énergie fossile, de limiter sa consommation totale d'énergie et de stabiliser jusqu'en 2000 ses émissions de CO<sub>2</sub> au niveau de 1990. La Suisse fut ainsi l'un des premiers pays à formuler des objectifs de réduction de ses émissions de CO<sub>2</sub>, et ceci, notons-le bien, sept ans avant la signature du Protocole de Kyoto.

En 2001, le programme SuisseEnergie a pris la relève d'Energie 2000 et défini cinq objectifs en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables. SuisseEnergie prévoyait de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 10 pour cent jusqu'en 2010 (par rapport à 1990), d'abaisser la consommation d'énergie fossile de 10 pour cent et de limiter l'augmentation de la consommation d'électricité à 5 pour cent (par rapport à 2000). Ce programme visait en outre à accroître la part des énergies renouvelables et à renforcer la position de la force hydraulique dans la production d'énergie au niveau suisse. Les résultats de fin 2009 montrent que seuls ces derniers objectifs ont été atteints (SuisseEnergie, 2010, p. 5).

Le 11 juin 2010, le Conseil fédéral a confirmé les intentions du programme SuisseEnergie pour la décennie en cours (DETEC, 2010). Au lieu de définir des objectifs quantitatifs, celui-ci soutient maintenant sur le fond et de façon concertée les grands axes de la politique climatique et énergétique. La loi sur l'énergie (RS 730) contient depuis 2007 les objectifs suivants: 1. Augmenter la production annuelle moyenne d'électricité à partir d'énergies renouvelables d'au moins 5400 GWh jusqu'en 2030 par rapport au niveau de l'an 2000, ce qui représente une hausse d'environ 15 pour cent. 2. Porter à au moins 2000 GWh la part de la force hydraulique à cette augmentation. 3. Stabiliser la consommation d'énergie finale des ménages au niveau de 2008 jusqu'en 2030.

##### b) La loi sur le CO<sub>2</sub> et sa révision

Dans le cadre du Protocole de Kyoto, la Suisse s'est engagée à abaisser ses émissions de gaz à effet de serre de 8 pour cent par rapport à 1990. La loi sur le CO<sub>2</sub>, en vigueur depuis 1999, a été promulguée pour atteindre cet objectif. Elle prévoit que durant la période de 2008 à 2012, les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de l'utilisation d'énergies fossiles doivent être en moyenne de 10 pour cent inférieures au niveau de 1990.<sup>5</sup> Les émissions provenant de l'utilisation énergétique de combustibles fossiles doivent être abaissées de 15 pour cent, celles issues de carburants fossiles de 8 pour cent. Selon les estimations de fin 2011, l'on s'attend à ce que les émissions de CO<sub>2</sub> selon la loi sur le CO<sub>2</sub> ne diminueront en réalité que de 3 à 5 pour cent par rapport à 1990 (OFEV, 2011). Ceci tient

<sup>5</sup> La loi prévoit en outre que des réductions des émissions réalisées à l'étranger peuvent être prises en compte pour atteindre l'objectif. L'ordonnance sur l'imputation du CO<sub>2</sub> stipule que ceci est possible jusqu'à 3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub> par an.

## Complément: Répartition du fardeau dans le contexte des négociations des Nations Unies sur le climat

### Reto Knutti

ETH Zürich, Institute for Atmospheric and Climate Science, Universitätstrasse 16, 8092 Zürich, reto.knutti@env.ethz.ch

Une étude d'INFRAS et de l'EPF de Zurich (Infras, 2012) au sujet des réductions des émissions et de la répartition du fardeau au niveau mondial conclut, de façon similaire au présent travail, que la marge de manœuvre pour atteindre l'objectif des 2°C est relativement étroite, que cet objectif ne peut être réalisé que moyennant de très importantes percées technologiques, que les réductions des émissions proposées pour 2020 au niveau mondial ne suffisent pas et que tous les pays et secteurs doivent participer.

L'étude d'INFRAS examine quatre scénarios qui débouchent sur trois propositions de répartition du fardeau discutées dans les négociations internationales sur le climat. Ces trois propositions sont toutes compatibles avec l'objectif des 2°C, elles se distinguent seulement par la répartition du fardeau. Voici une brève description des quatre scénarios:

- 1) Aucune intervention visant à protéger le climat (business as usual, BAU)
- 2) Proposition indienne (IND-PRO): Les pays « participants » (au début ceux de l'annexe I) réduisent leurs émissions en vue d'atteindre ensemble l'objectif des 2°C. Chaque pays « non participant » devient un pays « participant » lorsque ses émissions par habitant dépassent la moyenne des « participants » ou un certain seuil du revenu par habitant (PIB).
- 3) Mêmes émissions par habitant: Chaque pays a droit aux mêmes émissions par habitant cumulées de 1990 à 2100 (Cumulative per Capita, CPC). La répartition dans le temps après 2010 n'est pas prescrite et est illustrée ici par une fonction de Spline.
- 4) Responsibility Capacity Indicator (RCI): La part d'un pays à la réduction totale des émissions est déterminée par le RCI. Cet indicateur prend en compte à raison de 75 pour cent les émissions par habitant des dix années précédentes (responsabilité historique) et de 25 pour cent le produit social brut attendu par habitant (possibilité de fournir une contribution).

L'idée centrale des trois propositions de réduction des émissions est la responsabilité commune mais différenciée. Tous les pays doivent assumer ensemble la responsabilité, mais la contribution d'un pays à la réduction totale varie en fonction de ses émissions présentes et passées et de ses possibilités technologiques et financières. Les réductions des émissions varient pour les différents pays suivant la manière de déterminer et pondérer leur responsabilité historique et leurs moyens financiers. Quelle répartition du fardeau est équitable ne peut pas être déterminé uniquement par des arguments scientifiques.

Le tableau 1 rassemble, pour différentes périodes et répartitions du fardeau, les émissions totales (cumulées) des pays figurant à l'annexe I et de ceux n'y figurant pas. Les émissions des pays de l'annexe I sont semblables pour la proposition indienne et le RCI. La proposition pour des « émissions par habitant cumulées égales » donne beaucoup de poids aux émissions historiques et actuelles. Il s'ensuit que les émissions futures de ces pays doivent baisser pratiquement à zéro jusqu'en 2100. Vu que ces pays ne peuvent pas stopper leurs émissions immédiatement, celles-ci devront à un moment donné devenir négatives, c'est-à-dire que la compensation à l'étranger et la séquestration du CO<sub>2</sub> devront dépasser les émissions. Ces chiffres changent si les émissions cumulées ne sont pas prises en compte depuis 1990, mais à partir d'une date antérieure ou postérieure.

Dans toutes ces propositions pour la répartition du fardeau, il est manifeste que les émissions cumulées jusqu'en 2100, tant dans les pays figurant à l'annexe I que dans ceux n'y figurant pas, seront inférieures en gros d'un facteur trois ou davantage à celles du scénario sans intervention. Des réductions radicales des émissions sont donc inévitables partout et pour toutes les propositions.

Pour l'Europe occidentale, il ressort des trois propositions que les émissions devraient être abaissées d'au moins 80 pour cent jusqu'en 2050 par rapport à aujourd'hui, et de nettement davantage dans le cas d'émissions par habitant égales. Il ne sera pas facile de trouver une répartition équitable du fardeau. Mais un résultat robuste peut être déduit de l'étude d'INFRAS: toute interprétation raisonnable

de l'équité implique que l'Europe occidentale – et donc aussi la Suisse – doivent réduire leurs émissions de CO<sub>2</sub> massivement déjà pendant les prochaines décennies si l'on entend atteindre l'objectif des 2°C (figure 1).

	2010–2020				2010–2030				2010–2050				2010–2100			
Emissions cumulées par approche (Gt de CO <sub>2</sub> )	IND-PRO	CPC	RCI	BAU	IND-PRO	CPC	RCI	BAU	IND-PRO	CPC	RCI	BAU	IND-PRO	CPC	RCI	BAU
Pays figurant à l'annexe I	184	167	182	182	293	238	303	353	391	176	429	701	437	-10	500	1501
Pays ne figurant pas à l'annexe I	293	273	293	298	588	535	576	656	1015	1039	978	1583	1282	1510	1223	3949

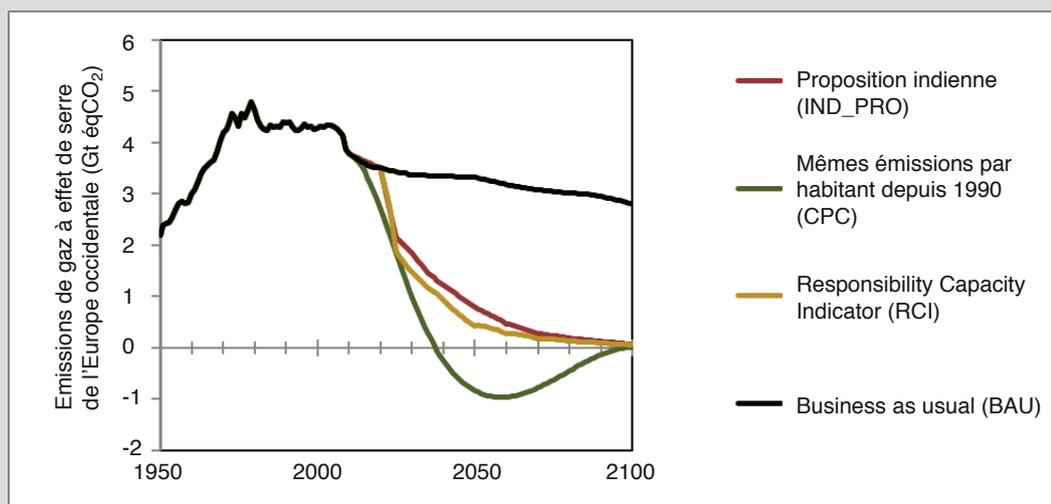


Tableau 1 / Figure 1: Emissions de gaz à effet de serre en Europe occidentale pour un scénario sans intervention visant à protéger le climat (BAU) et pour trois propositions de répartition du fardeau (CPC, RCI, IND\_PRO) en vue d'une stabilisation de 2°C de la température (avec une probabilité de 66 pour cent). (Infras, 2012)

### Bibliographie

Füssler, J., Herren, M., Guyer, M. Rogelj, J. and Knutti R. (2012): Emission pathways to reach 2°C target – Model results and analysis; Swiss Federal Office for the Environment (FOEN), INFRAS and ETH Zurich, 61 pp.

avant tout à la forte augmentation relative aux carburants. L'objectif légal ne pourra donc être atteint que par l'achat de certificats d'émission étrangers.

En 2009, le Conseil fédéral a soumis au Parlement une proposition de révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>. Cette proposition prévoit que les objectifs de réduction soient poursuivis aussi au-delà de 2012 de manière à ce que la totalité des émissions de gaz à effet de serre (et pas seulement celles de CO<sub>2</sub> provenant de la production d'énergie) soit réduite d'au moins 20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport aux niveaux de 1990. Cette réduction doit être de 30 pour cent, si d'autres pays industrialisés se fixent un objectif semblable. Au moins la moitié de la réduction doit être réalisée en Suisse (Message relatif à la politique climatique suisse après 2012, 26 août 2009). Cette proposition est un contre-projet indirect à l'initiative populaire fédérale « pour un climat sain ». Celle-ci exige aussi une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 30 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990, mais entend qu'elle soit réalisée exclusivement en Suisse, et exclut donc la possibilité de mesures imputables prises à l'étranger.

### c) La société à 2000 watts

Le concept de la société à 2000 watts a été développé en 1998 par l'EPF de Zurich. Il appelle les habitants des pays industrialisés à employer une quantité d'énergie correspondant au plus à une consommation constante de 2000 watts, toutes formes d'énergie confondues, y compris l'énergie grise. Ces 2000 watts représentent la moyenne mondiale actuelle, alors que la moyenne en Europe et en Suisse est trois fois plus élevée.<sup>6</sup> Dans la société à 2000 watts, un quart seulement de l'énergie peut provenir de ressources non renouvelables. Le canton de Genève, de même que les villes de Bâle et de Zurich, se sont prononcées en faveur d'une réduction de leur consommation d'énergie allant dans cette direction. C'est l'un des scénarios possibles de la stratégie énergétique au niveau fédéral. Même si l'objectif de la société à 2000 watts n'est pas un objectif climatique, sa réalisation n'est possible que moyennant une réduction massive de la consommation d'éner-

gies fossiles et donc des émissions de gaz à effet de serre. Un objectif intermédiaire correspondant a été défini en matière de réduction de la consommation moyenne d'énergie fossile jusqu'en 2050.

### 4.3.2 Autres possibilités pour fixer des objectifs climatiques

Sachant que la communauté internationale va mettre probablement encore beaucoup de temps pour fixer des objectifs de réduction communs, une procédure au niveau national est pertinente. Entrent en ligne de compte comme objectifs possibles: 1. une économie sobre en carbone (low-carbon economy), 2. une société sans carbone (zero-carbon society), ou 3. la neutralité climatique. Dans les deux premiers cas, les émissions nationales de CO<sub>2</sub> sont réduites progressivement à un niveau qui peut tendre vers zéro. Dans le cas de la neutralité climatique, l'une de deux variantes que le Conseil fédéral a pris en considération pour la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>, le pays n'est pas obligé d'abaisser ses émissions jusqu'à zéro, mais peut les compenser en finançant des réductions équivalentes à l'étranger. Une sorte de « superneutralité » est même envisageable: la Suisse compenserait non seulement ses émissions domestiques, mais de surcroît aussi celles associées à la production de biens et services qu'elle importe.<sup>7</sup>

Les propositions décrites ont ceci en commun que les objectifs climatiques sont fixés sans considérer les coûts qu'ils impliquent. Les approches présentées dans ce qui suit tiennent compte de ces coûts.

#### a) Analyse coût-utilité

La Suisse pourrait définir ses objectifs de politique climatique de façon purement égoïste exclusivement en fonction des coûts et des avantages pour le pays. Les mesures prises en Suisse ont manifestement peu d'influence sur le climat, vu que ce pays ne cause que quelques pour mille des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Dans le meilleur des cas, les efforts de la Suisse ont un effet de signal et encouragent d'autres pays plus importants pour le climat à renforcer leur action. La Suisse montrerait qu'il est possible de réduire mas-

<sup>6</sup> 2000 watts correspondent à une consommation d'énergie de 17 500 kWh par an ou de 1700 litres d'huile de chauffage ou d'essence.

<sup>7</sup> Les « émissions grises » de gaz à effet de serre, concernées par l'échange de quotas d'émission, équivalent à peu près à trois quarts des émissions directes de gaz à effet de serre de la Suisse. Elles proviennent pour l'essentiel du secteur énergétique (OFEV, 2007).

sivement ses émissions de gaz à effet de serre sans mettre son économie en danger. Elle pourrait en outre mettre des mesures à l'épreuve et promouvoir le développement de solutions techniques qui pourraient être aussi exportées. Tout ceci peut renforcer le capital politique de la Suisse.

Il est probable que les bénéfices secondaires d'un objectif climatique politique ambitieux soient plus grands pour un petit pays comme la Suisse que les effets directs sur le climat. Ces avantages additionnels comprennent, à part l'incidence sur le poids politique, l'amélioration de la qualité de l'air, la diminution des importations d'énergie, une moindre dépendance à l'égard des marchés énergétiques, la hausse de la productivité, le développement de produits innovants et exportables (cleantech) etc.

Les coûts de la politique climatique sont plus simples à évaluer que son utilité (voir à ce sujet aussi le chapitre 5). L'établissement d'un bilan des coûts et des avantages permet de définir les efforts de politique climatique de façon optimale, en maximisant la différence entre coûts et utilité. Stefan Felder et Reto Schleiniger (2002) ont effectué un tel calcul à l'aide d'un modèle complet de l'économie nationale. Il conclut à un bilan optimal pour une réduction des émissions de CO<sub>2</sub> de 30 pour cent jusqu'en 2010 par rapport à 1990, dans l'hypothèse où la Suisse aurait imposé les différentes formes d'énergie en fonction des coûts externes que leur utilisation occasionne au pays. Une telle imposition aurait entraîné une maximisation de la différence entre l'utilité et le coût de la consommation d'énergie.

#### b) Prise en compte des coûts externes

Au lieu d'un objectif d'émission, on pourrait donner aux émissions de gaz à effet de serre un prix reflétant les dommages causés au pays (pollution) ou à la planète (changement climatique). L'Office fédéral de l'énergie et la SIA (SIA 480, 2004) recommandent d'augmenter le prix de l'huile de chauffage de 4.5 ct/kWh (ou 45 ct/litre) et celui du gaz de 3 ct/kWh, pour tenir compte des conséquences économiques de la forme d'énergie choisie dans des bâtiments.<sup>8</sup> En comparaison, la taxe sur le CO<sub>2</sub> ne se monte depuis 2010 qu'à 9 ct/litre pour l'huile de chauffage et à 0.65 ct/kWh pour le gaz naturel.

Il existe de nombreuses estimations des coûts liés au changement climatique par tonne

de CO<sub>2</sub> produite en plus. Elles varient considérablement selon les conséquences pronostiquées et l'estimation des dommages subis loin dans l'avenir. La plupart des estimations se situent dans une fourchette de 5 à 50 dollars US par tonne de CO<sub>2</sub>, mais quelques évaluations, également sérieuses, approchent les 100 dollars US (Yohe et al., 2007; Aldy et al., 2010).

La prise en considération des dommages causés par les émissions de gaz à effet de serre dans le reste du monde ne se justifie pas seulement par une forme d'altruisme. Il est envisageable en effet que les victimes du changement climatique puissent exiger réparation de la part de ceux qui l'ont causé. Etant donné que les pays industrialisés portent une part prépondérante de la responsabilité, ils devraient ajouter environ deux tiers aux coûts externes de leurs émissions de gaz à effet de serre. Ceci impliquerait des coûts externes de 59 dollars US par tonne de CO<sub>2</sub>, dans l'hypothèse où le prix moyen par tonne de CO<sub>2</sub> serait estimé à 35 dollars US (Landis & Bernauer, 2011).

#### c) La loi sur la protection de l'environnement

Si l'on ne parvenait pas à s'accorder sur un objectif en matière d'émissions de CO<sub>2</sub> ou de leur réduction, il faudrait au moins, selon la loi, mettre en œuvre toutes les mesures économiquement supportables. L'article 11 de la loi fédérale du 7 octobre 1983 sur l'environnement (RS 814.01) prescrit de limiter la pollution atmosphérique dans la mesure que permettent l'état de la technique et les conditions d'exploitation et pour autant que cela soit économiquement supportable. Plusieurs études ont montré qu'il existe diverses mesures dont les coûts nets pour les pollueurs sont très faibles, voire négatifs, parce que l'économie d'énergie qu'elles permettent de réaliser fait souvent plus que compenser les coûts desdites mesures.

#### d) Objectifs dans d'autres domaines

Les objectifs de la politique climatique sont étroitement liés à ceux de la politique énergétique. Cette dernière a conduit à la création d'une base légale pour les premières mesures nationales et cantonales en faveur du climat. En conséquence, les scénarios énergétiques peuvent remplacer le cas échéant ceux dédiés à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cela pourrait être le cas pour le scénario de la société à 2000 watts décrite plus haut,

<sup>8</sup> Ces chiffres se basent cependant sur une évaluation des coûts externes de 1994.

pour les scénarios de l'abandon progressif des énergies fossiles ou de l'autonomie énergétique. Les scénarios pour le développement d'énergies renouvelables, les transports publics, la promotion des véhicules électriques, etc., contribuent aussi à réduire les émissions de gaz à effet de serre du pays. Eux tous peuvent être regroupés en un parcours de transformation du système énergétique, qui réunit les mesures visant l'efficacité énergétique et le développement de nouvelles énergies et encourage l'innovation (Energy Science Center de l'EPF de Zurich, 2008).

## 4.4 Définition d'un objectif climatique

Il est difficile d'évaluer un objectif (climatique) sans préciser comment il doit être atteint. Un objectif ambitieux peut mettre en danger le bien-être économique si les dispositions qui s'y rapportent compromettent le bon fonctionnement de l'économie. En ce sens, le choix d'un objectif ambitieux – à propos du climat comme en d'autres domaines – constitue un défi que la société et ses institutions se posent elles-mêmes : il faut trouver des chemins permettant d'atteindre l'objectif avec un minimum de dommages dans d'autres domaines. La décision de sortir du nucléaire est un exemple d'un tel défi auto-imposé dans le domaine énergétique. A l'inverse, choisir un objectif climatique modeste correspond à opter pour une solution de facilité ou à douter de pouvoir effectivement atteindre un objectif ambitieux.

### 4.4.1 Critères pour fixer un objectif climatique

#### a) L'équité

Les décisionnaires en Suisse n'accepteront les mesures, éventuellement radicales, requises pour atteindre un objectif que s'ils l'estiment équitable. Ils feront la comparaison avec les objectifs d'autres pays coresponsables du changement climatique. Aussi l'objectif choisi doit-il non seulement refléter la part de responsabilité de notre pays, mais correspondre aussi à nos possibilités d'entreprendre des efforts concrets. Il importe en même temps de s'en tenir à l'objectif fixé, pour que d'autres pays soient prêts à consentir un engagement comparable.

Au niveau national, les efforts doivent être répartis de façon équitable entre les géné-

rations, sachant que les générations futures auront de surcroît à faire face aux conséquences du changement climatique. En outre, la charge imposée aux différents groupes de la population, branches commerciales et régions doit être proportionnée et adaptée. Si cela n'est pas possible, des mesures compensatoires seront nécessaires. En fin de compte, la répartition des efforts et donc le fardeau à porter par les différents groupes dépendront probablement moins de l'objectif lui-même que du choix des mesures prises pour l'atteindre.

#### b) La flexibilité

Un objectif flexible offre un plus grand choix de moyens pour l'atteindre. Un objectif pour les émissions jusqu'en 2050 est ainsi plus flexible qu'un plan de réduction qui fixe les niveaux des émissions pour les années intermédiaires ou une réduction annuelle totale. L'objectif à long terme laisse une marge de manœuvre pour la répartition des mesures dans le temps. De même, un objectif pour la somme de tous les gaz à effet de serre est plus flexible que des objectifs spécifiques pour chacun d'entre eux ou pour ceux émis par différentes sources (p.ex. comme la distinction entre carburants et combustibles dans la loi sur le CO<sub>2</sub>).

Le choix d'un objectif flexible permet de tenir compte de décisions dans d'autres domaines. A part l'objectif du bien-être économique, il y a des objectifs sectoriels tels que le maintien de l'agriculture, la sortie du nucléaire, etc.

La flexibilité est nécessaire aussi étant donné les nombreuses incertitudes liées aux conséquences du changement climatique ou au développement économique et technologique. Si les conséquences se révélaient plus graves qu'attendu, un renforcement de l'objectif devrait être possible. Il en va de même si des innovations techniques permettent de baisser les coûts de réduction des gaz à effet de serre. A l'inverse, l'objectif devrait permettre d'allonger l'horizon temporel au cas où le pays serait secoué par une grave crise économique. Toutefois, la flexibilité recèle aussi des risques. Un danger est notamment que des mesures efficaces soient purement et simplement ajournées en raison de la flexibilité des objectifs.

#### c) L'efficacité

Un objectif de réduction ambitieux conduit à une réduction substantielle des émissions de gaz à effet de serre. Il encouragera en outre d'autres pays à accroître leur effort. A l'inverse,

un objectif de réduction modeste irrite tous ceux qui ont déjà fait des efforts, tandis que ceux qui sont restés inactifs ne seront guère motivés à agir.

L'exigence d'efficacité de l'objectif peut aller à l'encontre de celle de flexibilité. Un objectif de réduction jusqu'en 2050 peut être atteint de manières très différentes. Cependant, la probabilité de l'atteindre est plus faible si la génération à venir doit supporter un fardeau plus lourd que la génération présente. En comparaison, l'objectif a plus de chance d'être réalisé si un plan impose aux autorités des objectifs de réduction contraignants pour chaque année. Des objectifs sectoriels réduisent aussi la flexibilité, mais attribuent clairement à chacun des groupes d'acteurs la responsabilité qui lui incombe.

#### 4.4.2 Conflits entre critères

Le choix entre flexibilité et efficacité revient à décider entre confort matériel à courte vue et sécurité climatique à long terme. C'est ce qu'illustre une comparaison d'objectifs absolus et relatifs. Un objectif absolu définit un niveau d'émission ou de réduction bien précis, alors qu'un objectif relatif varie en fonction de plusieurs grandeurs d'influence. L'intensité de carbone, c'est-à-dire le rapport des émissions de CO<sub>2</sub> au PIB, est un exemple caractéristique d'objectif relatif. Des objectifs relatifs peuvent aussi se rapporter à la population.

Les objectifs relatifs sont moins radicaux que les absolus si la valeur de référence (le PIB ou la population) croît. La Chine par exemple s'est engagée à Copenhague, dans le cadre de la conférence des Nations Unies sur le climat, d'abaisser son intensité de carbone de 40 pour cent jusqu'en 2020. Toutefois, cela n'empêchera pas ce pays d'augmenter ses émissions de CO<sub>2</sub> s'il maintient jusque-là sa croissance économique annuelle moyenne de 6 pour cent (elle est même d'environ 8 pour cent actuellement) (Pécllet, 2009). Les objectifs absolus sont à leur tour moins exigeants que les relatifs si la valeur de référence décroît. La Russie par exemple a rempli confortablement son objectif de Kyoto grâce à sa désindustrialisation après la dissolution de l'Union soviétique et a vendu ses droits d'émission excédentaires à des pays qui ne pouvaient pas respecter leurs engagements. On a parlé de « hot air » à propos de ces droits excédentaires.

Il y a également conflit entre les critères de flexibilité et d'efficacité à propos de la possibilité de réaliser un objectif de réduction en

partie à l'étranger. Que la Suisse réduise ses propres émissions ou qu'elle veille à ce que la même quantité d'émissions soit évitée ailleurs dans le monde, la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère diminue dans la même mesure. C'est pourquoi le Protocole de Kyoto prévoit qu'un pays puisse atteindre son objectif de réduction soit en prenant des mesures sur son propre territoire, soit en les réalisant dans un autre pays. Cette flexibilité élargit considérablement le spectre des mesures possibles de réduction et diminue les coûts. Malheureusement, il est très difficile de constater si la réduction d'émissions à l'étranger a été obtenue vraiment seulement grâce à l'intervention du pays tenu de la réaliser (condition de l'additionnalité). C'est pourquoi l'efficacité de telles mesures est controversée.

Il convient, lors de la définition d'objectifs nationaux, d'être attentif en outre à la cohérence de la démarche. Si l'objectif national de la Suisse est défini en accord avec d'autres pays en tenant compte des capacités de chacun, il ne serait pas cohérent que la Suisse compense ses émissions trop élevées par des réductions d'autres partenaires de l'accord. Un financement de mesures de réduction à l'étranger est absurde également si l'objectif national est fixé en fonction d'avantages pour le pays (diminution de la pollution etc.). En revanche, si l'objectif national est défini sans approbation internationale et que les autres pays ne prennent pas de mesures de réduction de leurs émissions, il est tout à fait pertinent de financer des réductions des émissions dans ces pays. Cependant, le danger existe alors que toutes les possibilités de réduction bon marché (low hanging fruits) soient épuisées. Ces pays entreraient alors dans une situation difficile s'ils veulent réduire eux-mêmes leurs émissions ultérieurement.

## 4.5 Conclusions

Une fois l'objectif climatique clairement défini – les émissions de gaz à effet de serre doivent diminuer radicalement dans le monde entier – l'objectif sera clair aussi pour la Suisse : elle ne peut pas se tenir à l'écart. On peut se disputer sur la part équitable de ce petit pays, qui se situe dans la moyenne pour les émissions par habitant, mais dans le peloton de tête pour le revenu et la capacité technologique. Différentes études ont appliqué divers critères pour calculer cette part. Les résultats sont relativement robustes pour le proche avenir : la Suisse doit abaisser ses émissions de gaz à effet de serre de

20 pour cent jusqu'en 2020 par rapport à 1990. Ceci correspond aussi à l'objectif prévu par la loi sur le CO<sub>2</sub> révisée.

Les choses deviennent plus difficiles après 2020. Il est à craindre que les émissions mondiales augmenteront encore pendant plusieurs décennies. Dans un tel contexte, chaque tonne supplémentaire nuit beaucoup plus qu'aujourd'hui. Aussi chaque pays conscient de ses responsabilités devrait-il arrêter complètement ses émissions d'ici le milieu du siècle. Il y a en outre de nombreuses bonnes raisons pour la Suisse de ne plus utiliser de carbone, du moins plus comme source d'énergie. Ce qui était vrai il y a plus de cent ans pour ses chemins de fer, lorsqu'ils furent les premiers au monde à être complètement électrifiés, l'est aussi dans le contexte actuel.

Bien entendu, la politique ne peut pas être guidée seulement par des objectifs climatiques, pas même la politique énergétique. Il y a sou-

vent des conflits d'objectifs en politique climatique. Ils sont responsables de ce que si peu ait été entrepris jusqu'ici contre le changement climatique. Mais les conflits d'objectifs ne doivent pas inciter à ne rien faire. La réponse des scientifiques est qu'il faut un instrument pour chaque objectif. En d'autres termes, il faudrait, pour chaque critère de la politique climatique, mettre en œuvre une autre composante de cette politique. Une trajectoire globale de réduction, solidement définie, devrait soutenir l'objectif d'efficacité. Le choix de la nature des instruments (des instruments de conduite au lieu d'obligations et interdictions, voir paragraphe 5.2) est déterminant pour la flexibilité. Et l'équité devrait être assurée par des paiements compensatoires et des dispositions dans d'autres domaines politiques (aide au développement, mesures d'atténuation des répercussions sur le plan social, mesures d'adaptation pour les générations futures).

## Complément: Politique énergétique et climatique

### Alexander Wokaun

General Energy (ENE), PSI; CH-5232 Villigen PSI; alexander.wokaun@psi.ch

La « stratégie énergétique 2050 » du Conseil fédéral définit des objectifs pour une transformation en profondeur de notre système énergétique. Elle entend accroître de façon très significative l'efficacité énergétique et la production d'électricité issue d'énergies renouvelables. Les centrales nucléaires existantes ne seront pas remplacées à la fin de leur durée de vie limitée pour des raisons de sécurité, ce qui rend nécessaire, au moins pendant une phase de transition, le recours à des centrales à cycles combinés et de cogénération, alimentées au gaz.

Elle s'en tient en même temps aux objectifs de protection du climat, et notamment à la nécessité de réduire les émissions domestiques de CO<sub>2</sub>, tels qu'ils sont discutés dans le présent rapport.

Dans ce contexte, il importe de rendre attentif aux relations entre les différents secteurs de notre système énergétique. La production d'électricité fossile émet certes du CO<sub>2</sub> supplémentaire, mais si le gain d'efficacité qu'elle entraîne permet en même temps d'économiser davantage de CO<sub>2</sub> dans d'autres secteurs, il est possible en principe de réaliser une économie nette de CO<sub>2</sub>. Un exemple est le remplacement de chauffages à mazout ou à gaz par des pompes à chaleur. Le couplage chaleur-force décentralisé peut aussi contribuer à la production d'électricité climatiquement neutre, s'il permet de se substituer à la production de chaleur obtenue jusqu'ici par des agents fossiles. L'électromobilité et la motorisation par pile à combustible sont d'autres exemples: du fait de l'efficacité élevée de ces systèmes de traction, l'électricité consommée en plus a pour contrepartie une économie nettement supérieure de carburants fossiles et donc une réduction correspondante des émissions de CO<sub>2</sub>.

Enfin, la séparation du dioxyde de carbone produit et son stockage géologique (capture et séquestration du carbone) est discutée comme option pour la compensation indigène des émissions.

Les synergies mentionnées sont possibles, mais ne se réalisent pas toutes seules. Elles doivent être créées délibérément par un projet considérant le système énergétique dans sa totalité. La nécessité de continuer de réduire substantiellement les émissions de CO<sub>2</sub> après 2050 implique en outre que les équipements requérant de longs cycles d'investissements (p.ex. la construction de tunnels) soient aménagés en conséquence. C'est pourquoi la prise en compte des objectifs de réduction des émissions prend une très grande importance lors de l'élaboration de la stratégie énergétique 2050.

## **Complément: La politique climatique suisse contribue-t-elle à réduire les émissions globales de gaz à effet de serre ?**

### **La problématique de l'additionnalité des mesures de compensation**

#### **Johann Dupuis**

Institut de Hautes Etudes en Administration Publique IDHEAP, Quartier UNIL Mouline, 1015 Lausanne, johann.dupuis@idheap.unil.ch

L'additionnalité est un critère fréquemment utilisé dans l'évaluation des politiques publiques (Mceldowney, 1997). Une politique est additionnelle lorsque les effets qu'elle vise peuvent lui être attribués avec certitude et ne découlent pas de facteurs situationnels. Pour vérifier cette condition, on élabore un scénario de référence qui simule l'évolution de la situation sans la politique en question. La portée réelle de l'intervention peut ainsi être mesurée.

En politique climatique, l'additionnalité joue un rôle particulièrement important. Afin de réduire les coûts et de stimuler la décarbonisation de l'économie mondiale, le Protocole de Kyoto a introduit les « mécanismes de flexibilité ». Ces derniers permettent aux pays industrialisés d'apporter une contribution financière et technique à des projets de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les pays en développement (MDP) et dans les Etats de l'ex-Union soviétique (MOC). Les effets de tels projet sont quantifiés et, après un processus de certification, la CCNUCC accorde des certificats CER (réduction certifiée des émissions) qui peuvent être soustraits des objectifs de réduction du pays donneur. Toutefois, cette logique de compensation ne participe à la protection du climat que si les projets de réduction sont additionnels, c'est à dire, irréalisables sans la contribution technique ou financière du pays donateur. Si les mesures en question pourraient être menées à bien sans mécanismes de flexibilité, la compensation n'est pas climatiquement neutre. Pire, elle accroît la quantité totale de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, parce que des droits d'émissions supplémentaires sont accordés au pays donateur pour des mesures qui auraient été de toute façon mises en œuvre.

L'additionnalité des projets de réduction des gaz à effet de serre est toujours difficile à démontrer. Environ 70 pour cent des projets MDP se font actuellement en Chine et en Inde, et la majorité de ces projets portent sur les énergies renouvelables. Or, ces deux Etats poursuivent des politiques d'expansion de grande ampleur dans ce domaine. Aussi, l'assertion que la réalisation de projets hydroélectriques serait impossible sans les mécanismes de flexibilité est peu crédible. Selon certain auteurs, la majorité des projets hydroélectriques chinois ne sont ainsi aucunement additionnels (Schneider, 2009). A l'appui de cette thèse, il y a la constatation que les demandes de certification sont souvent déposées une fois l'installation construite (A. Zhao et al, 2011). En dernière instance, il y a une forte asymétrie entre la certitude économique que la quantité de gaz à effet de serre à laquelle les certificats donnent droit sera émise et l'incertitude scientifique sur la question de savoir si cette même quantité a été effectivement évitée par un effort de réduction additionnel.

La Suisse est particulièrement concernée par cette problématique, et ceci pour deux raisons. Premièrement, en tant qu'ancien membre de la coalition JUSCANNZ (Japon, USA, Canada, Norvège, Nouvelle-Zélande), elle a soutenu, dès le début des négociations internationales, le recours aux mécanismes de flexibilité. Deuxièmement, la Suisse doit diminuer ses émissions de CO<sub>2</sub> de 8 pour cent en moyenne (par rapport à l'année de référence 1990) sur la période de 2008 à 2012 selon l'objectif fixé dans le cadre du protocole de Kyoto, ce qui correspond à environ 21 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>. Or, la Suisse compense à l'étranger 12 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, c'est à dire 57 pour cent de ses engagements internationaux en matière de protection du climat (Federal Office for the Environment (FOEN), 2009a). Début 2012, la Confédération et la Fondation pour le centime climatique ont signé un contrat additionnel, ce qui devrait encore accroître la part des émissions compensée à l'étranger. En comparaison, l'Allemagne ne compense que 22 pour cent de ses émissions à l'étranger, la France 13.5 pour cent et l'Italie 15 pour cent (Galharret, 2009). Les politiques climatiques françaises et allemandes accordent délibérément un rôle secondaire aux mécanismes de flexibilité (Ministère de l'écologie et du développement durable, 2006; Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU), 2012). En Italie, la part réalisée à l'étranger peut aller jusqu'à 20 pour cent de l'objectif de réduction (Ministry for the Environment Land and Sea, 2007). La situation de la Suisse est insatisfaisante dans la mesure où le Protocole de Kyoto ne prévoit l'usage des mécanismes de flexibilité que de manière complémentaire aux mesures domestiques (art. 6.1 et 17). Cette problématique de l'additionnalité débouche sur la question délicate de savoir si la Suisse a fourni, pendant

les cinq années passées, la contribution prévue et souhaitée à la réduction globale des émissions de gaz à effet de serre. Si l'on considère le développement économique et social de la Suisse depuis 1990, il apparaît que les émissions de la Suisse auraient augmenté fortement pendant les vingt-deux dernières années, si aucun effort n'avait été concédé parallèlement sur le plan domestique (BAFU 2009b). Une initiative populaire et d'intenses négociations au Parlement auront pour effet que la politique climatique de la Suisse se concentrera davantage sur des mesures domestiques pendant la période à venir de 2013 à 2020.

### Bibliographie

- A. Zhao et al. (2011), Not Sustainable, Not Additional: The Rise of Municipal Solid Waste Incineration in China. Gaia, Global Alliance for Incinerator Alternatives, [www.no-burn.org](http://www.no-burn.org).
- Federal Ministry for the Environment Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) (Ed.) (2012), Fifth National Report of the Government of the Federal Republic of Germany, Berlin.
- Federal Office for the Environment (FOEN) (Ed.) (2009a), Switzerland's Fifth National Communication under the UNFCCC, Bern.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (Ed.) (2009b), Treibhausgasentwicklung ab 1990 ohne Massnahmen, Econcept – Zürich, 80 pp.
- Galharret, S. (2009), Climate and Energy Package: Would too many offsets hollow out the EU Package? IDDRI SciencesPo.
- Mceldowney, J. J. (1997), Policy Evaluation and the Concepts of Deadweight and Additionality, *Evaluation*, 3(2), 175–188.
- Ministère de l'écologie et du développement durable (Ed.) (2006), Quatrième communication nationale à la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, Paris.
- Ministry for the Environment Land and Sea (Ed.) (2007), Fourth National Communication under the UN Framework Convention on Climate Change, Italy.
- Schneider, L. (2009), Assessing the additionality of CDM projects: practical experiences and lessons learned, *Climate Policy*, 9(3), 242–254.

## Bibliographie

- Aldy, J. E., Krupnick, A. J., Newell, R. G., Parry, I. W. H. and Pizer, W. A. (2010), Designing Climate Mitigation Policy, *Journal of Economic Literature*, 48(4), pp. 903–34.
- Athanasidou, T., Kartha, S., Baer, P. and Kemp-Benedict, E. (2009), Switzerland's Fair Share in a Climate Constrained World.
- Commission Européenne (2010), Europe 2020 – Une stratégie pour une croissance intelligente, durable et inclusive, Bruxelles.
- DETEC (2010), Concept SuisseEnergie 2011–2020.
- Energy Science Center der ETHZ (2008), Energiestrategie für die ETH Zürich, Zürich.
- Felder, S. and Schleiniger, R. (2002), National CO<sub>2</sub> Policy and Local Externalities: Some General Equilibrium Results for Switzerland, *Energy Economics*, 24(5), pp. 509–522.
- Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) (2007), Contribution du Groupe de travail III au quatrième Rapport d'évaluation « Bilan 2007 des changements climatiques: L'atténuation des changements climatiques ». Résumé à l'intention des décideurs.
- Landis, F. and Bernauer, T. (2011), Regional carbon pricing could motivate emerging economies to join the global mitigation effort *Climate Economics and Law Conference*, Berne.
- Netherlands Environmental Assessment Agency (PBL) (2009), Sharing developed countries' post-2012 greenhouse gas emission reductions based on comparable efforts, Bilthoven, The Netherlands.
- OFEV, O. f. d. l. e. (2007), Graue Treibhausgas-Emissionen der Schweiz, 1990–2004, Berne.
- Péclet, J.-C. (2009) Chine et Etats-Unis: objectifs minimalistes, *Le Temps*, 27 novembre.
- Philibert, C. (2005), Approaches for future international co-operation, OECD/International Energy Agency, Information papers for the Annex I Expert Group on the UNFCCC COM/ENV/EPOC/IEA/SLT(2005)6, Paris, France.
- SuisseEnergie (2010), 9<sup>e</sup> Rapport Annuel SuisseEnergie 2009/2010, Ittigen.
- UNEP (2010), The Emissions Gap Report.
- Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WGBU) (2009), Der WBGU-Budgetansatz, Factsheet 3/2009.
- Yohe, G. W., Lasco, R. D., Ahmad, Q. K., Arnell, N. W., Cohen, S. J., Hope, C., Janetos, A. C. and Perez, R. T. (2007), Perspectives on climate change and sustainability, in *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, edited by M. L. PARRY, et al., pp. 811–841, Cambridge University Press, Cambridge, UK.



## 5 Coûts et avantages d'un objectif climatique ambitieux

Lucas Bretschger et Roger Ramer

D-MTEC, Center of Economic Research at ETH Zurich CER-ETH, ETH Zürich, CH-8092 Zürich; lbretschger@ethz.ch

- Du point de vue économique, un objectif climatique ambitieux peut avoir des conséquences positives aussi bien que négatives. Il est difficile de trancher lesquelles l'emportent.
- Les conséquences négatives éventuelles d'une augmentation du prix de l'énergie sont à mettre en balance avec les conséquences positives imputables à la stimulation de l'innovation en matière de technologies efficaces en énergie et aux coûts d'adaptation évités.
- Les résultats des études examinées montrent qu'une trajectoire de réduction ambitieuse, compatible avec l'objectif des 2°C, est réalisable et économiquement supportable pour la Suisse. Par rapport au scénario de référence sans mesures de réduction des émissions, la perte de bien-être se situe, suivant l'horizon temporel considéré, entre 0.36 et 2.5 pour cent.

### 5.1 La situation

Comme indiqué au chapitre 4, la Suisse s'est engagée, dans le cadre du Protocole de Kyoto, à une réduction de ses émissions. En 2012, l'arrivée à échéance de ce protocole met un terme à l'accord le plus complet de la politique climatique mondiale. Les discussions au sujet d'un accord lui faisant suite sont en cours depuis quelques années. Aucune décision n'a été prise jusqu'ici quant à des objectifs et mesures de réduction contraignants. Seule a été fixée comme valeur cible à long terme une limite supérieure du réchauffement terrestre de 2 °C au maximum. Elle doit permettre de maintenir les effets du changement climatique dans des limites tolérables. Pour que cet objectif puisse être atteint avec un degré de probabilité suffisant, il faut réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre, et ce en particulier dans les pays industrialisés (et donc aussi en Suisse). Comme présenté au chapitre 3, des réductions de 25 à 45 pour cent par rapport à 1990 sont nécessaires dans le court délai qui nous sépare de 2020, et de 80 à 95 pour cent à moyen terme (jusqu'en 2050). La question se pose alors de savoir quelles seront les conséquences de la réalisation de tels objectifs de réduction et des mesures politiques connexes, et ce tant au niveau mondial que régional (p.ex. national). Ce chapitre entre plus en détail sur les effets possibles au plan national.

Du point de vue économique, les interventions de la politique climatique peuvent avoir des effets à différents niveaux. Il est difficile d'estimer si l'ensemble de ces effets est positif ou négatif. On postule souvent que des objectifs de réduction (trop) élevés ont des conséquences négatives, qui touchent avant tout certains secteurs. Selon cette argumentation, des objectifs très ambitieux conduiraient à un affaiblissement de la compétitivité, en particulier lorsque les objectifs climatiques ne sont pas ou pas suffisamment coordonnés. L'explication donnée pour justifier ce raisonnement est qu'en général les objectifs climatiques sont liés à une hausse du prix du facteur réglementé (énergie fossile). Une telle hausse de prix peut être problématique pour des branches gourmandes en énergie et à faible potentiel d'investissement. Toujours selon cette argumentation, il pourrait s'ensuivre des délocalisations plus nombreuses de la production dans des régions du monde moins réglementées et, partant, une érosion de l'emploi au niveau national. Plusieurs Etats et régions défendent cette position et estiment que des objectifs de réduction contraignants les désavantageraient par rapport à des pays moins réglementés. Ils craignent que leur position s'affaiblisse dans le contexte international.

D'autre part, la théorie de l'innovation induite considère que le renchérissement d'un facteur de production peut entraîner

une intensification de l'innovation visant à utiliser ce facteur de façon plus efficace. Dans le contexte de la politique climatique et d'une hausse des prix dans le secteur de l'énergie, une intervention de la politique climatique stimulerait donc les investissements en faveur de l'efficacité énergétique et de nouvelles technologies plus performantes. A long terme, ces investissements et l'utilisation précoce, qui leur est liée, de nouvelles technologies peuvent apporter des avantages comparatifs. Ceci vaut notamment si l'on tire des enseignements de l'utilisation de ces technologies (learning by doing). Grâce à cet effet d'apprentissage et au savoir-faire qu'il permet d'acquérir, les coûts baissent avec le temps. Cet avantage en termes de coûts, par rapport à des pays ou régions qui ne se convertissent que plus tard aux nouvelles technologies, peut avoir des effets positifs à plusieurs égards.

Pour établir plus solidement le niveau d'importance de ces deux effets opposés, nous allons examiner maintenant de façon systématique les principaux déterminants des coûts et de gains qui peuvent résulter des interventions de la politique climatique au niveau national.

## 5.2 Coûts des mesures de réduction des émissions

S'il faut réduire le recours à un facteur de production ou « intrant » tel que l'énergie fos-

sile, on peut soit en limiter la quantité par des prescriptions, soit en modifier le prix par des mesures de marché. Les impôts et les taxes d'incitation prélevés sur l'intrant à réglementer sont des exemples de mesures touchant aux prix. Ces augmentations de prix ont pour but de provoquer un changement de comportement. En relevant le prix de l'intrant, l'impôt accroît aussi les coûts de production pour les entreprises qui recourent à cet intrant. L'idée est de les inciter à moins l'utiliser. Une entreprise concernée par une telle réglementation peut réagir de différentes manières. Elle peut par exemple reporter l'augmentation du prix sur les consommateurs. Il s'ensuit un nouvel équilibre du marché : un prix plus haut et une demande quantitativement plus faible (voir figure 1). Le produit de l'impôt (surface grise) est redistribué et ne représente donc aucun coût du point de vue de l'économie nationale. Il s'agit seulement d'une redistribution entre plusieurs groupes économiques. Les coûts (statiques) de l'impôt pour l'économie nationale sont représentés dans le diagramme par les surfaces rouge et verte.

Une deuxième possibilité est qu'une entreprise concernée réagisse à un impôt ou une taxe d'incitation en remplaçant l'intrant réglementé par un autre. Dans le cas d'une hausse du prix de l'énergie fossile utilisée dans la production, cela signifie la remplacer davantage par du travail, du capital ou de l'énergie non fossile. Si ce potentiel de substitution est

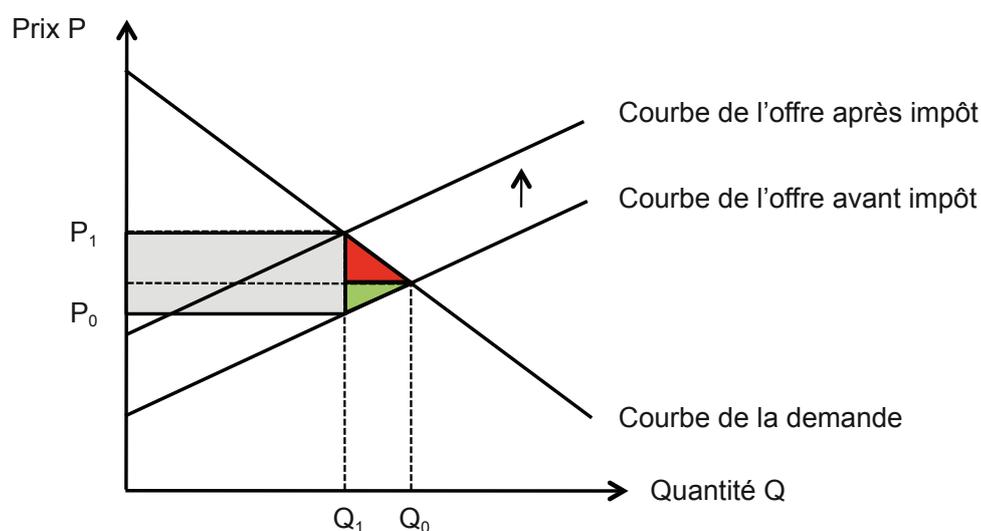


Figure 1 : Coûts statiques d'impôts sur les émissions. Les surfaces rouge et verte représentent les pertes dans le surplus des consommateurs et des producteurs respectivement. On appelle surplus des consommateurs la différence entre l'estimation d'un bien par le consommateur et le prix du marché. Le surplus du producteur est la différence entre le prix du marché et le prix auquel le producteur offrirait encore son bien.

important, la production peut être maintenue ou seulement légèrement réduite. Enfin, une entreprise concernée peut essayer d'exploiter de façon plus efficace l'intrant réglementé et investir pour cela dans de nouvelles technologies. Dans l'idéal, ceci permet de produire la même quantité avec moins d'énergie. S'y ajoute à long terme, comme décrit plus haut, un éventuel avantage comparatif. L'ampleur des coûts directs de la réglementation dépend donc d'une part du degré de facilité avec lequel l'énergie fossile peut être remplacée par d'autres intrants dans le processus de production. D'autre part, la possibilité de recourir à de nouvelles technologies ainsi que le potentiel d'investissement existant y relatif jouent aussi un rôle. Les entreprises, branches et régions peuvent différer fortement les unes des autres à cet égard.

Ce sont d'une part les fournisseurs de l'intrant frappé par une réglementation, et d'autre part les branches qui dépendent très fortement de cet intrant et dont les produits vont renchérir le plus qui sont principalement affectés par une telle réglementation. En effet, la demande pour leurs produits va diminuer. Une intervention à long terme de la politique climatique sous la forme d'un renchérissement des énergies fossiles induit donc une transformation des structures de l'économie de marché réglementée. Des secteurs qui dépendent fortement de l'énergie comme intrant et n'ont de ce fait qu'un faible potentiel de substitution perdront proportionnellement de l'importance. Tandis que des branches particulièrement innovantes auront la possibilité de mieux se positionner à long terme, voire d'accroître leur production. La théorie ne permet pas d'obtenir un pronostic clair quant au résultat net sur l'ensemble de l'économie; il faut pour cela des modèles de simulation numérique. Dans l'idéal, les innovations ainsi induites peuvent surcompenser les effets négatifs de la réglementation.

Comme indiqué déjà au paragraphe 5.1, les coûts d'un objectif ambitieux dépendent aussi de l'étranger. Si la Suisse se fixe des objectifs de réduction plus ambitieux que les autres pays, elle devra prendre des mesures plus radicales (par exemple une augmentation d'impôts). Une fiscalité plus élevée et donc l'augmentation des coûts de production peuvent être préjudiciables à la compétitivité. Cependant, des mesures plus radicales accroissent l'incitation à investir dans des technologies plus efficaces, ce qui peut avoir à long terme un effet positif sur la compétitivité.

Seule une analyse détaillée permettra de définir l'effet prédominant au niveau national, comme au niveau sectoriel. Il en va de même dans le cas contraire. Si la Suisse se fixe un objectif moins ambitieux que les autres pays, elle peut compter sur une hausse plus faible des prix de l'énergie et elle sera moins pénalisée qu'à l'étranger. Les incitations à innover seront par contre plus faibles. Une coordination des objectifs de réduction permet de réduire ces incertitudes.

### 5.3 Avantages des mesures de réduction des émissions

D'autres arguments parlent en faveur d'objectifs de réduction ambitieux, outre les effets positifs sur l'innovation et les progrès qui en résultent en matière d'efficacité énergétique présentés plus haut. Une étude de la Banque mondiale, publiée en 2010 (World Bank, 2010), arrive à la conclusion que les coûts d'adaptation (sans prise en compte des coûts liés aux dégâts) à un monde plus chaud de 2 °C en 2050 (comparé à 2010) se situeront entre 75 et 100 milliards de dollars US par an. Si l'objectif des 2 °C ne peut pas être respecté, les coûts d'adaptation seront plus élevés. Le rapport Stern (2007) présume qu'un réchauffement plus fort occasionnera à long terme une augmentation exponentielle des coûts. Des mesures précoces permettent donc de réduire significativement les coûts d'adaptation futurs. Elles permettront, de plus, de réduire voire même d'éviter partiellement les coûts générés par les dommages qui seront provoqués par le réchauffement planétaire.

Les réductions des émissions entraînent de surcroît d'autres avantages qui ne sont pas directement liés à la prévention ou à la réduction des coûts liés aux mesures d'adaptation et à l'apparition de dommages (bénéfices secondaires). A relever à cet égard en premier lieu les effets positifs d'une concentration plus faible de polluants dans l'air sur la santé humaine. Ceci permet par exemple d'éviter de coûteuses pertes de productivité et de revenu dues à des maladies ainsi que les frais de traitement (voir econcept / Office fédéral de l'environnement, 2008). La mortalité à long terme et les maladies affectant les voies respiratoires devraient également nettement reculer (voir OcCC, 2000).

Une concentration plus faible en polluants présente d'autres effets secondaires positifs,

## Complément: Mise en œuvre de la politique climatique

### Peter Knoepfel

Pol. publique & Durabilité, Inst. de Hautes Etudes en Administration Publique, IDHEAP  
Université de Lausanne, Quartier UNIL, CH-1015 Lausanne; peter.knoepfel@idheap.unil.ch

Toute politique publique travaille avec un modèle de causalité. Celui-ci indique quels groupes sont touchés par le problème public que la politique se propose d'éviter (les bénéficiaires), et quels groupes sont considérés comme responsables de l'existence du problème (les groupes cibles). Le modèle de causalité théorise en outre comment amener ces groupes cibles à changer leur comportement afin de résoudre le problème (hypothèse d'intervention).

Dans le modèle de causalité de la politique climatique, le risque d'un réchauffement planétaire a été désigné comme problème collectif et politiquement reconnu. Ce réchauffement se manifestera sous la forme de nombreux changements, variables selon les régions, lesquels pourraient entraîner à leur tour des dommages considérables pour certains groupes d'acteurs et ce particulièrement dans le futur. Dans l'intérêt de ces groupes (les bénéficiaires), l'Etat intervient au niveau international, national, cantonal et communal auprès de ceux dont on admet aujourd'hui qu'ils seraient responsables des dommages (groupes cibles). L'intervention a pour but de modifier le comportement de ces groupes de manière à minimiser les risques.

Le modèle de causalité varie selon le but visé par l'intervention. Dans le cas de stratégies d'évitement (réduction du CO<sub>2</sub>), les groupes cibles sont les émetteurs et les bénéficiaires, les victimes (actuelles et futures) des impacts du changement climatique dont le préjudice est atténué par des réductions des émissions. Dans le cas des stratégies d'adaptation, les victimes font également partie des groupes cibles, puisqu'ils ne sont pas seulement bénéficiaires des stratégies de protection, mais on attend également d'eux qu'ils s'adaptent activement aux effets du changement climatique (au lieu d'en bénéficier passivement).

La politique climatique suit les mêmes règles que les politiques environnementales: sans un soutien actif de la part des bénéficiaires, les acteurs publics ne peuvent guère s'imposer contre la résistance des émetteurs (à l'encontre des stratégies d'évitement). Et sans un tel soutien, il ne sera pas possible d'imposer non plus des stratégies d'adaptation contre la résistance des émetteurs et des bénéficiaires qui devraient être amenés à s'adapter sur une base individuelle.

Il s'ensuit que pour les deux stratégies (en excluant les bénéficiaires qui vivent loin de nous dans l'hémisphère Sud), il convient d'identifier les bénéficiaires vivant présentement sur le territoire et les convaincre du fait qu'ils sont menacés par les dommages climatiques (p.ex. dans le secteur du tourisme et de l'agriculture) et qu'ils devraient s'en protéger en souscrivant aux principes d'une stratégie d'adaptation. Cette protection ne peut pas être obtenue gratuitement ni financée par les victimes. Il faut donc faire entre autres appel au prélèvement de taxes climatiques auprès des émetteurs (sur le plan domestique).

Comme toute politique publique, la politique climatique a un intérêt primordial à mobiliser activement les bénéficiaires. A cette fin, partant des résultats d'analyses politiques, il lui faut organiser sur place une mise en scène de son problème public (p.ex. un monitoring des dommages dans l'arc alpin et sur le Plateau). Il s'agit de démontrer la nécessité des mécanismes de compensation des dommages, comme c'est déjà le cas depuis longtemps dans d'autres politiques (régionale, agricole, etc.). Cela fonctionne beaucoup mieux pour une stratégie d'adaptation que pour une politique de prévention, car c'est un fait que le fameux objectif des 2°C est certes techniquement et économiquement réalisable, mais en revanche difficile à communiquer au niveau politique.

Un poison pour toute politique publique est de promettre des objectifs irréalistes et de devoir en même temps reconnaître publiquement qu'ils ne sont pas atteignables. Cela s'est déjà vu, dans le cas des valeurs limites d'immissions ambitieuses que les seuils d'émission individuels ne permettent en général pas de respecter (p.ex. NO<sub>x</sub> et automobiles). La prévention de dommages climatiques par des mesures visibles pour les bénéficiaires, et l'indemnisation de la population touchée (p.ex. consécutivement à des crues ou à des épisodes de sécheresse) grâce à des recettes obtenues sur la base de taxes climatiques payées par les émetteurs, est un objectif réaliste. Celui-ci serait parfaitement compris tant par les groupes cibles qui doivent prendre leurs responsabilités, que par les bénéficiaires de telles stratégies. Ces derniers n'auront pas de scrupules moraux à exiger ces versements, pour autant qu'une relation causale puisse être démontrée entre les émetteurs et les impacts du changement climatique, qui soit au moins aussi

plausible que celle de l'additionnalité souvent problématique des actuels investissements climatiques en Suisse et à l'étranger.

Fixer des plafonds au réchauffement ou des objectifs de réduction des émissions exprimés en pour cent ne satisfait guère à l'exigence de plausibilité. De telles formulations d'objectifs sont entachées d'incertitudes et parviennent mal à mobiliser les bénéficiaires (actuels ou futurs) de la politique. Bien entendu, les objectifs de réduction (globaux) doivent être maintenus, puisque toute taxe sur le CO<sub>2</sub> en dépend. Mais en l'état, ce n'est pas le prélèvement des fonds, mais leur utilisation qui est difficile à communiquer. L'utilisation des recettes pour la prévention et l'indemnisation serait une alternative aisée à transmettre et plus robuste au niveau théorique et conceptuel.

### Bibliographie

Peter Knoepfel, Corinne Larrue, Frédéric Varone, Sylvia Veit (2011). *Politikanalyse*. Opladen & Farmington Hills.

Knoepfel, P., Nahrath, S., Varone, F., Savary, J., & Johann Dupuis (2010). La politique de protection du climat. In *Analyse des politiques suisses de l'environnement*. Zürich: Rüegger.

Dupuis, J., & Knoepfel, P. (2011). Les barrières à la mise en oeuvre des politiques d'adaptation au changement climatique: le cas de la Suisse. *Revue suisse de science politique*, 17(1).

Dupuis, J. (forthcoming, 2012). Les barrières à la mise en oeuvre des politiques publiques d'adaptation au changement climatique: le cas de l'Inde, du Pérou et de la Suisse. Unpublished Ph. D. Thesis in Public administration, IDHEAP, Université de Lausanne, Lausanne.

## Complément: Des mesures de réduction en Suisse ou à l'étranger?

### Thomas Bürki

Energie Ökologie Politikberatung, Thomas Bürki GmbH, Gerlisbrunnenstr. 20, CH-8121 Benglen; thomas.buerki@thb.ch

A propos des réductions de CO<sub>2</sub>, une question se pose fréquemment, avant tout dans les milieux économiques: les réductions sont-elles moins chères en Suisse ou à l'étranger? Les considérations suivantes peuvent aider à clarifier les choses. Trois cas sont examinés.

#### 1. Réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par des mesures prises en Suisse

Pour évaluer la rentabilité des mesures d'amélioration et décider de leur réalisation, les entreprises se réfèrent d'ordinaire au délai de retour de l'investissement. Celle-ci doit être sensiblement inférieure à la durée de vie escomptée de la mesure. Les délais de retour se situent typiquement entre deux et cinq ans, mais peuvent atteindre environ sept ans dans des cas exceptionnels; la durée de vie de mesures techniques est typiquement de dix à quinze ans ou davantage.

Si la mesure d'amélioration a pour but de réaliser une réduction du CO<sub>2</sub>, elle conduit en général à une diminution de la consommation d'énergie fossile, par exemple par une augmentation de l'efficacité énergétique dans le domaine thermique. Les économies qui en résultent au niveau des coûts correspondent à l'épargne sur les dépenses pour les supports énergétiques fossiles. L'investissement est donc à comparer en premier lieu avec la diminution des dépenses pour l'énergie.

Les taux de rendement de telles mesures se situent entre environ 40 pour cent (délai de retour de deux ans) et 10 pour cent (délai de retour de sept ans). En d'autres termes: la mesure est rentable parce qu'elle procure un gain tout au long de sa durée de vie. Dans le cas limite d'un délai de retour égal à la durée de vie de l'investissement, on a un jeu à somme nulle, c'est-à-dire que les coûts de l'énergie sont remplacés par des coûts en capitaux (taux de rendement = 0, mais perte = 0 également).

Pour résumer l'essentiel: la mesure d'amélioration réalisée dans l'entreprise conduit à une réduction du CO<sub>2</sub> en économisant de l'énergie fossile; cette réduction du CO<sub>2</sub> entraîne en même temps une diminution des coûts – les coûts de réduction du CO<sub>2</sub> sont négatifs.

#### 2. Diminution des émissions de CO<sub>2</sub> par des réductions à l'étranger, c'est-à-dire par l'achat de certificats de réduction

Réduire les émissions de CO<sub>2</sub> à l'étranger signifie réaliser un projet dans un pays en développement ou émergent (« projet MDP»). Etant donné que le pays en question n'est pas soumis à une limite pour ses

émissions de CO<sub>2</sub>, la mesure doit être additionnelle, c'est-à-dire rentable uniquement grâce à la vente des certificats de réduction de CO<sub>2</sub> générés par le projet. En d'autres termes : les recettes supplémentaires issues de la vente des certificats doivent permettre au projet de franchir le seuil de rentabilité.

Par cet achat de certificats (à effectuer annuellement) par l'entreprise suisse, les réductions de CO<sub>2</sub> réalisées dans un pays en développement sont transférées en Suisse.

Pour résumer l'essentiel : rien ne change dans l'entreprise en Suisse, ses émissions de CO<sub>2</sub> restent les mêmes (et donc aussi ses dépenses pour l'énergie) ; la réduction de CO<sub>2</sub> étant accomplie par l'achat de certificats, elle entraîne des coûts supplémentaires correspondant au montant payé pour ces certificats.

#### **Effets secondaires :**

- a) Les projets MDP peuvent impliquer un transfert de technologie et de savoir-faire dans le pays en développement ou émergent et contribuer ainsi à son développement (industriel).
- b) Il peut y avoir, dans le pays hôte, des effets de rebond qui diminuent la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>.
- c) Les projets MDP peuvent n'être pas complètement additionnels (p. ex. en raison d'imperfections dans la procédure de certification) et conduire donc à une réduction de CO<sub>2</sub> inférieure à ce qu'elle aurait été si réalisée en Suisse.

Les effets secondaires ne sont pas quantifiés ici et, pour cette raison, pas pris en compte dans le calcul.

### **3. Cas particulier : réduction des émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse, financée par la Fondation pour le centime climatique**

Le « centime climatique » a été prélevé d'octobre 2005 à août 2012 dans les stations-service par litre d'essence ou diesel et versé à une fondation. Celle-ci a utilisé cet argent pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> par l'achat de certificats de réduction à l'étranger et en Suisse. Du fait que les ressources prélevées par le biais du centime climatique étaient affectées à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et qu'elles étaient importantes comparées à la réduction de CO<sub>2</sub> demandée, elles ont permis d'acheter les certificats à des prix élevés.

En Suisse, des réductions de CO<sub>2</sub> ont été achetées entre autres aux entreprises, et ce habituellement aux enchères. Les entreprises sont encouragées ainsi à réaliser des mesures supplémentaires de réduction du CO<sub>2</sub>, dont le coût est par nature nettement supérieur aux conditions de rentabilité. Les coûts excédentaires sont couverts par ces achats de certificats.

Pour résumer l'essentiel : il n'y avait pas de surplus de dépenses pour l'entreprise, mais pas non plus de réduction des coûts ; les coûts de réduction du CO<sub>2</sub> étaient cependant élevés, mais ils apparaissaient au niveau de l'économie nationale.

#### **4. Considération finale**

La comparaison des coûts de réduction du CO<sub>2</sub> pour les entreprises montre que ceux-ci sont négatifs quand les mesures sont prises dans l'exploitation, tandis que l'achat de certificats à l'étranger occasionne des coûts supplémentaires à hauteur du prix de ces certificats. Les coûts de réduction de mesures supplémentaires assumés par la Fondation pour le centime climatique se situent par nature dans la fourchette des prix payés pour de telles réductions.

#### **5. Remarque conclusive**

Si une entreprise est confrontée au défi d'abaisser ses émissions de CO<sub>2</sub> et que le critère déterminant n'est pas la rentabilité ou les coûts annuels, mais les liquidités, la décision prise peut alors être différente.

comme la diminution des dégâts aux bâtiments et matériaux. Il en résulte une réduction des besoins d'assainissement et rénovation de bâtiments et d'autres infrastructures. Enfin, la biodiversité en profitera aussi.

Ces dernières années, diverses études ont analysé les conséquences économiques de l'introduction de différents objectifs de réduction. Elles sont unanimes à conclure (en dépit de différences, en partie importantes, au niveau de la méthode et des modélisations) que les conséquences et les coûts des objectifs de réduction sont relativement peu importants. Cela montre que les effets positifs d'une réglementation sont suffisamment forts en Suisse pour permettre dans tous les cas de compenser à peu près les effets négatifs, ou du moins de les endiguer.

Nous allons maintenant examiner de façon plus approfondie quelques études ainsi que leurs principaux résultats.

### 5.3.1 Lucas Bretschger, Roger Ramer et Florentine Schwark :

#### **Growth Effects of Carbon Policies : Applying a Fully Dynamic CGE Model with Heterogeneous Capital. Resource and Energy Economics, 2011**

Cette étude analyse les conséquences économiques à long terme d'une politique climatique de la Suisse conforme à l'objectif des 2 °C. La base de cette analyse est un modèle de simulation multisectoriel incluant douze branches. Il se concentre sur la Suisse et intègre l'étranger par le biais du commerce international de la Suisse. Les taux de croissance des différents secteurs sont le résultat de modélisations basées sur le principe de l'accumulation de capital, c'est-à-dire qu'ils sont calculés de manière endogène par les flux d'investissements et innova-

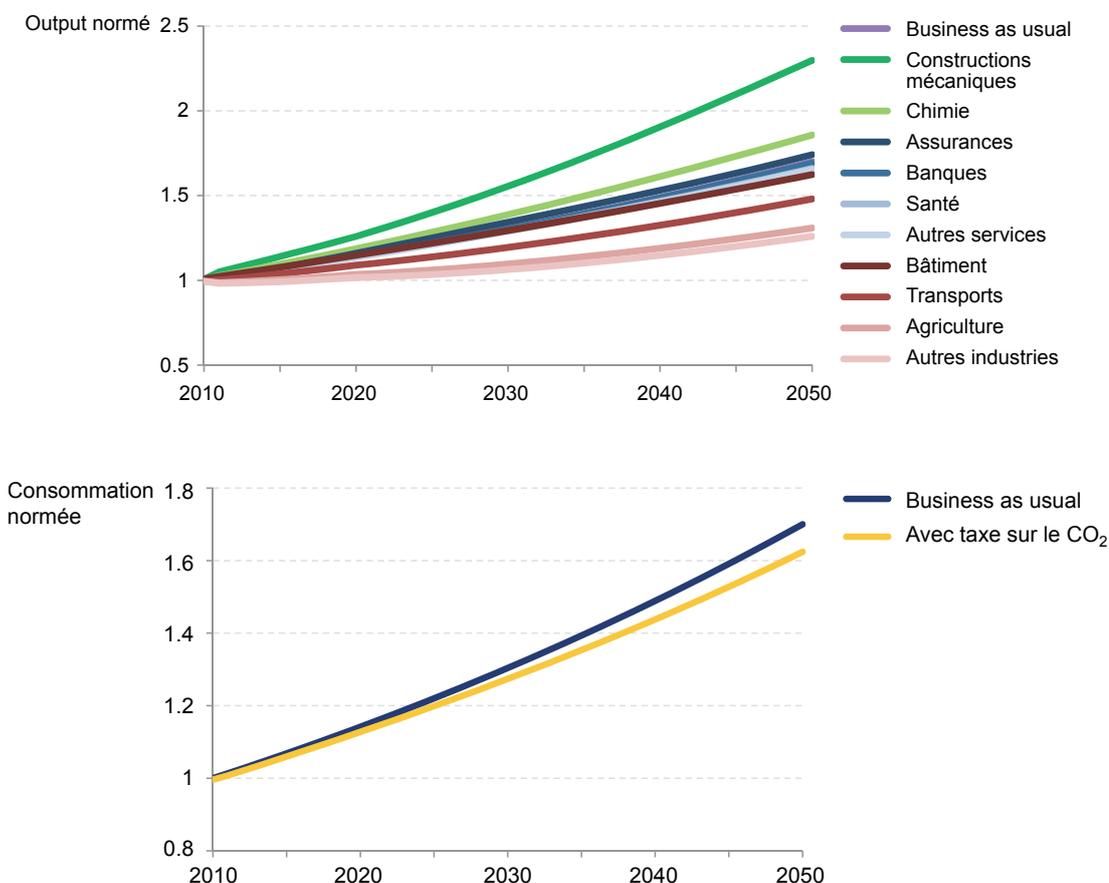


Figure 2 : Evolution, selon le modèle CITE, de l'économie dans le cadre d'une politique climatique (Bretschger, Ramer & Schwark, 2011)

tions. L'objectif de la politique simulée est de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> de 30 pour cent jusqu'en 2020 et de 80 pour cent jusqu'en 2050. Ces réductions d'émissions doivent contribuer à atteindre l'objectif des 2 °C. Une taxe d'incitation sur l'utilisation d'énergie fossile sert d'instrument politique. Cette taxe augmente par itération jusqu'au moment où sa valeur permet d'atteindre les deux objectifs. En 2020, elle s'élève à 220 francs par tonne de CO<sub>2</sub>, en 2050 à 1100 francs. Les effets de cette politique sont comparés à un scénario de référence (business as usual) qui ne prévoit pas de mesures au niveau politique. Il est supposé qu'aucune disposition relative au climat n'est prise non plus à l'étranger. Le taux de croissance annuel moyen de l'économie dans le scénario de référence est de 1.33 pour cent.

Les résultats montrent que cette réglementation a une influence modérée sur le développement économique (voir figure 2). Le taux de croissance économique annuel diminue légèrement, de 0.1 pour cent, et descend ainsi à 1.23 pour cent; il s'ensuit une perte de prospérité d'environ 2.5 pour cent alors que ce modèle n'intègre pas les bénéfices secondaires. Un changement structurel se produit au niveau sectoriel: les secteurs à haute activité d'innovation (par exemple la construction mécanique et la chimie) ainsi que les secteurs peu énergivores gagnent en importance. Les secteurs particulièrement gourmands en énergie connaissent un recul en comparaison relative, mais continuent néanmoins de croître. L'utilisation de ces recettes fiscales dans les domaines de la recherche et l'innovation des secteurs concernés produit des résultats encore meilleurs. Ceci démontre le rôle central de l'innovation et des investissements comme moteurs de la croissance dans un contexte réglementé. Les secteurs qui réagissent à la hausse des prix de l'énergie en investissant davantage dans l'innovation se développent même mieux à long terme que sans intervention fiscale.

L'effet comparativement modéré s'explique aussi par la dépendance énergétique relativement faible tant des ménages que de la production. Au vu du faible écart existant entre les deux trajectoires de croissance, on peut supposer que l'intégration des effets secondaires sur le bien-être réduirait encore cet écart par rapport au scénario de référence. Suivant l'ampleur impact de ces effets secondaires,

les mesures de réduction pourraient même conduire à un gain global par rapport à la trajectoire de référence.

### 5.3.2 Raphael Bucher:

#### **Mitigation, Adaptation, Technological Change and International Trade: Economic Aspects of Unilateral Climate Policies. PhD Thesis, University of Berne, 2011**

Ce travail considère un horizon temporel plus court (2008 à 2020). C'est moins l'effet de la croissance qui figure au premier plan que la détermination des taux d'imposition optimaux nécessaires pour atteindre un certain objectif. L'auteur définit l'objectif de réduction en se référant à l'annonce faite en 2009 par le Conseil fédéral d'abaisser les émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse de 20 pour cent jusqu'en 2020. Pour son analyse, il se sert d'un modèle de simulation qui comporte dix-sept secteurs, douze biens de consommation, et cinq types de ménage qui se distinguent par leur revenu. Dans le scénario de référence, indépendant de toute intervention politique, le taux de croissance économique est supposé atteindre 0.8 pour cent par an. L'instrument choisi ici est aussi un impôt, prélevé soit sur toutes les énergies fossiles, soit seulement sur les combustibles.

Pour pouvoir réduire les émissions de 20 pour cent jusqu'en 2020, l'impôt sur le CO<sub>2</sub> doit passer de 40 francs par tonne de CO<sub>2</sub> en 2008 à 280 francs par tonne de CO<sub>2</sub> en 2020. Si seuls les combustibles sont imposés, l'impôt en 2020 s'élève à environ 500 francs par tonne de CO<sub>2</sub>. L'effet de l'impôt est relativement modéré. La production recule certes dans tous les secteurs, à l'exception du secteur public, mais la diminution maximale jusqu'en 2020 n'est que légèrement supérieure à 2 pour cent. Les effets au niveau des ménages sont aussi modestes. Dans ce cas, la perte de bien-être est au maximum de 0.9 pour cent.

Dans l'hypothèse où le secteur de la mobilité se développe sur le plan technologique et où l'effet d'apprentissage conduit à une utilisation plus efficace et économe de l'énergie, la pression fiscale diminue, à objectif de réduction égal. Un taux d'imposition de 260 à 360 francs par tonne de CO<sub>2</sub> suffit dans ce cas à réduire les émissions de 20 pour cent.

### 5.3.3 André Sceia et al. :

#### **Sustainability, neutrality and beyond in the framework of Swiss post-2012 climate policy. NCCR Working Paper, No. 2008-07, 2008.**

Cette étude combine un modèle de simulation économique multirégional avec un modèle détaillé du secteur énergétique. A la différence des modèles discutés plus haut, elle prend en considération plusieurs régions du monde. Elle permet d'analyser les effets de différents objectifs climatiques au niveau national et international et de prendre en compte des objectifs qui diffèrent entre eux sur le plan international; elle ne présuppose donc pas forcément une coordination des objectifs. Il en ressort que même des objectifs climatiques comparativement ambitieux n'entraîneraient pratiquement pas de désavantages pour la Suisse. Si l'objectif visé est par exemple de réduire les émissions de 50 pour cent jusqu'en 2050, les effets sur le bien-être en Suisse sont en général plus faibles qu'à l'étranger, indépendamment du niveau, plus bas ou plus haut, des objectifs visés dans les autres pays. Cela s'explique principalement par un commerce extérieur qui tire parti des effets positifs consécutifs aux mesures de réduction. Le recul de la demande en énergie fossile en Suisse réduit fortement dans ce domaine sa dépendance à l'égard de l'étranger.

L'étude examine aussi les effets sur le secteur du logement. Elle montre que ce secteur peut apporter une contribution significative à la réduction des émissions visée. Il existe des technologies performantes grâce auxquelles les émissions peuvent être sensiblement réduites dans ce secteur, voire même dans certaines circonstances supprimées. Cela à condition que l'orientation future de la politique soit clairement définie et que les objectifs soient annoncés de bonne heure. Les investisseurs doivent avoir la certitude que des technologies de substitution sont payantes à long terme.

### 5.3.4 Ecoplan :

#### **Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Schweizer Post-Kyoto Politik. Bern, 2009 (Conséquences de la politique suisse post-Kyoto pour l'économie nationale)**

Cette étude considère également un horizon temporel court, jusqu'à 2020. Les émissions de CO<sub>2</sub> doivent être réduites en Suisse de 20 pour

cent d'ici 2020 (comme proposé lors des discussions menées dans le cadre de la révision de la loi sur le CO<sub>2</sub>). Si l'UE vise un objectif de réduction plus élevé, la Suisse peut augmenter le sien jusqu'à 30 pour cent. Indépendamment du scénario, une partie de la réduction peut être réalisée à l'étranger. Un modèle à un pays est utilisé pour l'analyse; il comprend au total dix-neuf secteurs ainsi que divers types de ménages (qui se distinguent par leur revenu). Dans le scénario de référence, le taux de croissance annuel du PIB est de 1.58 pour cent. La taxe sur le CO<sub>2</sub> sert d'instrument politique. Le produit de la taxe est redistribué aux ménages.

Le premier pas consiste à déterminer le montant de la taxe sur le CO<sub>2</sub> permettant d'atteindre les objectifs. Celle-ci se situe, suivant le scénario, entre 113 francs par tonne de CO<sub>2</sub> (pour une réduction de 20 pour cent, dont la moitié environ réalisée à l'étranger) et 245 francs par tonne de CO<sub>2</sub> (pour une réduction de 30 pour cent, dont la majeure partie réalisée en Suisse). Les conséquences économiques sont modérées: le taux de croissance annuel baisse au maximum de 0.18 pour cent. Les effets au niveau sectoriel sont relativement peu importants. Pour la plupart des industries, l'output diminue au maximum d'un peu plus de 4 pour cent. Les branches particulièrement gourmandes en énergie sont plus fortement touchées, alors que le secteur de la construction mécanique est avantagé, de même que celui du bâtiment.

Les pertes de bien-être sont elles aussi faibles dans l'ensemble. La perte s'élève à 0.36 pour cent pour une réduction des émissions de 20 pour cent jusqu'en 2020, et à 0.83 pour cent pour le scénario le plus ambitieux. Les ménages riches sont les plus fortement touchés, tandis que ceux disposant d'un faible revenu peuvent même être avantagés. La prise en compte des bénéfices secondaires liés aux réductions des émissions (par exemple la réduction des coûts de la santé et d'infrastructures, la diminution de la dépendance à l'égard de l'étranger pour l'énergie fossile, ou les plus fortes incitations à l'innovation) permet d'atténuer encore davantage les pertes de prospérité. Dans tous les scénarios, les bénéfices secondaires compensent en gros 10 pour cent des pertes de bien-être.

## 5.4 Conclusions

Les modélisations confirment le bien-fondé pour la Suisse d'une trajectoire de réduction en accord avec le chapitre 4 (réduction de 30 pour

cent jusqu'en 2020, de 80 pour cent d'ici 2050) et montrent qu'une telle trajectoire est réalisable. Bien que cet objectif soit ambitieux, les coûts sont estimés faibles à modérés. A noter que les calculs présentés présupposent que les objectifs sont fixés unilatéralement, et non pas dans le cadre d'un accord international. Si les objectifs et les mesures étaient coordonnés à l'échelon international, les coûts diminueraient encore pour la Suisse.

### **Bibliographie**

- Bretschger, L., Ramer, R., Schwark, F. (2011), Growth effects of carbon policies : applying a fully dynamic CGE model with heterogeneous capital, *Resource and Energy Economics* Vol. 33 (4), 963–980.
- Bucher, R. (2011), *Mitigation, Adaptation, Technological Change and International Trade: Economic Aspects of Unilateral Climate Policies*, PhD thesis, Universität Bern.
- Econcept (2008), *Reduktion Treibhausgasemissionen: Gutachten Sekundärnutzen*, Zürich.
- Ecoplan (2009), *Volkswirtschaftliche Auswirkungen der Schweizer Post-Kyoto Politik*, Bern.
- OcCC (2000), *Sekundärnutzen von Treibhausgas-Reduktionen*, Bern.
- Sceia, A., Altamirano-Cabrera, J.-C., Schulz, T. F., Vielle, M. (2008), *Sustainability, neutrality and beyond in the framework of Swiss post-2012 climate policy*, NCCR Working Paper 2008-07.
- Stern, N. (2007), *Stern review on the economics of climate change*, Cabinet Office – HM Treasury, Paperback, ISBN: 9780521700801, Cambridge University Press.
- World Bank (2010), *The cost to developing countries of adapting to climate change: new methods and estimates*, Washington D.C., World Bank.

## Les membres de l'OcCC

### Membres

*Kathy Riklin* (présidente), Conseillère nationale, Zurich  
*Charlotte Braun-Fahrlander*, Institut für Sozial- und Präventivmedizin, Universität Basel  
*Lucas Bretschger*, Center of Economic Research, ETH Zurich  
*Stefan Brönnimann*, Geographisches Institut, Universität Bern  
*Thomas Bürki*, Energie Ökologie Politikberatung, Bengelen  
*Andreas Fischlin*, Institut für Terrestrische Ökologie, ETH Zurich  
*Nicolas Gruber*, Institut für Biogeochemie und Schadstoffdynamik (IBP), ETH Zurich  
*Gabi Hildesheimer*, Ökologisch bewusste Unternehmen, Zurich  
*Fortunat Joos*, Physikalisches Institut, Universität Bern  
*Peter Knoepfel*, Inst. de Hautes Etudes en Administration Publique, IDHEAP, Lausanne  
*Christian Körner*, Botanisches Institut, Universität Basel  
*Bruno Schädler*, Geographisches Institut, Universität Bern  
*Andreas Spiegel*, Sustainability and Political Risk Management, Swiss Re, Zurich  
*Thomas Stocker*, Physikalisches Institut, Universität Bern  
*Philippe Thalmann*, Recherches en Economie et Management de l'Environnement, EPF Lausanne  
*Alexander Wokaun*, Forschungsbereich Allgemeine Energie, PSI Villigen

### Experts avec voix consultative

*Christoph Appenzeller*, MétéoSuisse, Zurich  
*Edith Bernhard*, Secétariat d'Etat à l'économie, Berne  
*Melanie Butterling*, Office fédéral du développement territorial, Berne  
*Lukas Gutzwiller*, Office fédéral de l'énergie, Berne  
*Roland Hohmann*, Office fédéral de l'environnement, Berne  
*Janine Kuriger*, Direction du développement et de la coopération, Berne  
*Christian Preiswerk*, Académie suisse des sciences naturelles, Berne  
*José Romero*, Office fédéral de l'environnement, Berne  
*Kurt Seiler*, Conférence des chefs de services et offices de protection de l'environnement de Suisse, Schaffhouse  
*Christine Zundel*, Office fédéral de l'agriculture, Berne

### Secrétariats exécutifs

*Christoph Kull*, OcCC, Berne  
*Christoph Ritz*, ProClim-, Académie suisse des sciences naturelles, Berne



**Direction du projet et rédaction :**  
Christoph Kull, OcCC

**Expertise extérieure à l'OcCC :**  
Prof. Heinz Wanner, Berne  
Prof. Frank Krysiak, Bâle

**Traduction :**  
Jean-Jacques Daetwyler, Berne

**Lectorat :**  
Muriel und Philippe Thalmann, Lausanne

**Langue originale :**  
Allemand

**Mise en page :**  
Esther Volken, OcCC

**Impression :**  
Vögeli AG Druckzentrum, 3550 Langnau

