



Akademien der Wissenschaften Schweiz  
Académies suisses des sciences  
Accademie svizzere delle scienze  
Academias svizras da las ciencias  
Swiss Academies of Arts and Sciences

# Repenser l'énergie

**Pour une utilisation et conversion efficaces de l'énergie**  
**Une contribution au développement durable en Suisse**



## **Impressum**

### **Éditeur**

Académies suisses des sciences  
Hirschengraben 11, Case postale 8160, 3001 Berne  
tél. 031 313 14 40, fax 031 313 14 50  
www.academies-suisse.ch, info@akademien-schweiz.ch  
© 2007

### **Rédaction**

Christoph Ritz, ProClim- Forum for Climate and Global Change (SCNAT)

### **Impression**

Vögel AG, Druckzentrum, 3550 Langnau

### **Mise en page**

Daniela Ambühl, Académie suisse des sciences humaines et sociales

### **Traduction**

Jean-Jacques Daetwyler, Bern  
Langue de l'édition originale: allemand

### **Léctorat**

Michel Carrard, Bolligen

### **Images**

Jenni Energietechnik, Oberburg: couverture, p. 31, 39  
Stefan Wermuth, Bern: p. 9  
Christoph Ritz, Bern: couverture, p. 5, 10, 13, 16, 19, 24, 29, 33, 35, 37, 43, 45

### **Tirage**

1500 Éx.

### **ISBN**

978-3-907630-30-3

# Repenser l'énergie

**Pour une utilisation et conversion efficaces de l'énergie  
Une contribution au développement durable en Suisse**

## La science au service de la société

Les Académies suisses des sciences regroupent les quatre Académies scientifiques suisses : Académie suisse des sciences naturelles SCNAT, Académie suisse des sciences médicales ASSM, Académie suisse des sciences humaines et sociales ASSH et Académie suisse des sciences techniques SATW.

Les Académies suisses des sciences mettent les sciences en réseau à l'échelon régional, national et international. Elles représentent la communauté scientifique dans le domaine spécifique mais aussi interdisciplinaire, indépendamment des institutions et des branches spécifiques. Le réseau s'y rattachant est largement soutenu et s'engage à l'excellence scientifique. Elles consultent la politique et la société sur les questions scientifiques importantes pour la société.'

academies-suisse  
akademien-schweiz  
academie-svizzera  
academias-svizras  
swiss-academies

## **Sommaire**

<b>Repenser l'énergie</b>	<b>5</b>
<b>Préface</b>	<b>9</b>
<b>Résumé</b>	<b>10</b>
<b>Zusammenfassung</b>	<b>13</b>
<b>Summary</b>	<b>16</b>
<b>Défis de l'utilisation de l'énergie et de l'approvisionnement énergétique dans le futur</b>	<b>19</b>
Les changements climatiques – un des plus grands défis en matière d'utilisation de l'énergie et d'approvisionnement	19
Risques géopolitiques dus aux besoins et à l'approvisionnement énergétiques	24
Le risque du prix de l'énergie une fois atteint le pic de production du pétrole	26
Défis aux systèmes politiques et sociaux	27
<b>Possibilités de solutions technologiques et entrepreneuriales</b>	<b>29</b>
La révolution de l'efficacité en matière d'utilisation des matériaux et de l'énergie, programme technologique de ce siècle	29
Utilisation plus intensive des biens et concepts urbains ménageant les ressources	32
Les énergies renouvelables : un potentiel considérable	33
Du rôle de l'énergie nucléaire, du gaz naturel et du charbon pour la production d'électricité en Suisse	35
<b>Conditions-cadres d'une politique énergétique durable</b>	<b>37</b>
De la possibilité de faire adopter une politique énergétique conforme au développement durable	37
Conditions-cadres et instruments	38
<b>Des chances pour l'économie et la science suisses</b>	<b>43</b>
Situation de la Suisse	43
Chances et avantages	44
<b>Conclusions</b>	<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>47</b>
<b>Glossaire et unités</b>	<b>49</b>





## Repenser l'énergie

### **Pour une utilisation et conversion efficaces de l'énergie Une contribution au développement durable en Suisse**

« Repenser l'énergie », publication des Académies suisses des sciences (académies-suisse), est un appel aux responsables de l'économie, de l'Administration, des organes politiques et du milieu scientifique en Suisse à répondre activement aux défis de l'approvisionnement en énergie et de l'utilisation de cette dernière dans le monde. Un abandon des agents énergétiques fossiles est à ce point urgent et la tâche a pris une telle ampleur que toutes les nations sont appelées à agir rapidement et les États riches tels que la Suisse à prendre les devants. Vu que les pays diffèrent les uns des autres quant à leur histoire, leurs ressources énergétiques et leurs phases de développement, leur degré de responsabilité varie selon qu'ils sont industrialisés, émergents ou en développement.

De novembre 2006 à juin 2007, « Repenser l'énergie » a subi un double examen critique par des experts des académies. Quarante-sept scientifiques de nombreuses disciplines ont apporté leur contribution au contenu de cette publication. Celle-ci a été finalement expertisée par des spécialistes désignés par les académies, puis approuvée par la présidence des académies-suisse.

## Auteurs

Marco Berg Dr., Präsident der Energiekommission der SATW,  
Eberhard Jochem Prof., Einzel-Mitglied der SATW  
Christoph Ritz Dr., Geschäftsleiter ProClim- (SCNAT)

## Avec la collaboration de

Aegerter Irene Dr., cogito foundation, Wollerau  
Andersson Göran Prof., ETH Zürich\*  
Baccini Peter Prof., SCNAT, Bern  
Biedermann Roger Dr., Schaffhausen  
Boulouchos Konstantinos Prof., ETH Zürich  
Braun-Fahrländer Charlotte Prof., Universität Basel\*\*  
Bretschger Lucas Prof., ETH Zürich  
Bürgenmeier Beat Prof., Université de Genève  
Dupont Jean-François, Pampigny  
Epiney Astrid Prof., Université de Fribourg  
Ganser Daniele Dr., Universität Basel\*  
Gessner Wolfgang Prof., Fachhochschule Nordwestschweiz, Olten  
Gutzwiller Felix Prof., Universität Zürich  
Hänni Hans Dr., SATW, Zürich  
Heck Pamela Dr., Swiss Re, Zürich  
Hofstetter Patrick Dr., WWF, Zürich  
Joos Fortunat Prof., Universität Bern\*\*  
Kaiser Tony Dr., Alstom (Schweiz) AG, Baden\*  
Kaufmann Michael, BFE, Ittigen  
Kaufmann-Hayoz Ruth Prof., Universität Bern  
Kiener Eduard Dr., Kirchlindach  
Kissling-Näf Ingrid Dr., SCNAT, Bern\*  
Knoepfel Peter Prof., Université de Lausanne  
Körner Christian Prof., Universität Basel  
Kriesi Ruedi Dr., Zehnder Group Management AG, Wädenswil  
Kröger Wolfgang Prof., ETH Zürich  
Leibundgut Hansjürg Prof., ETH Zürich\*  
Müller Walter, VSM, Zürich  
Neu Urs Dr., ProClim-, Bern  
Rapp Regula Dr., Universität Basel\*\*  
Reinhardt Ernst, Ecoprocess AG, Zürich  
Riedener Susanne, BAFU, Ittigen  
Rossi Michel Dr., EPF Lausanne  
Roth Thomas Dr., SECO, Bern  
Schädler Bruno Dr., BAFU, Ittigen  
Schär Christoph Prof., ETH Zürich

Stocker Thomas Prof., Universität Bern\*  
Thalmann Philippe Prof., EPF Lausanne  
Volken Esther, ProClim-, Bern  
Wanner Heinz Prof., Universität Bern  
Wild Martin Dr., ETH Zürich  
Wokaun Alexander Prof., PSI, Villigen\*  
Wüstenhagen Rolf Dr., Universität St. Gallen\*\*  
Zuberbühler Andreas Prof., Universität Basel\*\*

\* Participants à l'atelier

\*\* Reviewer de l'Académie





## Préface

La Suisse et le monde sont placés devant de grands défis dans le secteur énergétique. La stabilisation du climat exige d'abandonner rapidement les énergies fossiles. En outre, il ne sera bientôt plus possible d'accroître la production de pétrole conventionnel et de gaz naturel pour couvrir une demande en hausse. Il importe peu, en fin de compte, de savoir lequel de ces problèmes est le plus urgent et le plus lourd de conséquences. Les deux aspects nécessitent d'agir de façon résolue, car une mutation profonde en matière d'utilisation de l'énergie demandera à tout le moins plusieurs décennies.

La présente publication des Académies suisses des sciences (académies-suisse) donne un condensé des principaux faits et tendances et indique en même temps des pistes concrètes dans les champs d'action décisifs.

Les académies-suisse soutiennent expressément la vision à long terme du Conseil fédéral pour une société à 2000 watts. L'objectif formulé par les auteurs de la publication, visant à abaisser les émissions à 1 tonne de CO<sub>2</sub> par tête et année d'ici la fin du siècle, ne pourra toutefois être atteint que si pas plus de 500 watts proviennent de sources fossiles. Pour réaliser cet objectif à long terme, il importe de commencer à réduire les émissions ici et aujourd'hui, par petites étapes planifiables et réalistes au moins de 2% par an. Ceci ne peut réussir que par une approche concertée combinant l'encouragement et le développement des énergies renouvelables avec une augmentation substantielle de l'efficacité éner-

gétique. Tout retard rendra les mesures qu'il faudra prendre ultérieurement bien plus douloureuses et plus coûteuses.

L'idée, proposée parfois, de remplir les objectifs de réduction en totalité ou en majorité par l'achat de droits d'émission à l'étranger plutôt que par des mesures en Suisse est considérée d'un œil critique par les académies-suisse. Une telle manière de faire pourrait être notamment un signal fatal pour les pays émergents et en développement, laissant entendre que les pays industrialisés sont incapables d'abaisser l'émission de gaz à effet de serre ou ne sont pas disposés à le faire.

Les défis auxquels la politique énergétique doit faire face ne devraient pas être perçus par la Suisse comme une menace, mais en premier lieu comme une opportunité. Du fait de son industrie hautement développée et de son remarquable secteur des services, la Suisse est prédestinée pour offrir des services énergétiques globaux, l'entretien d'installations compris. Mais il faudra pour cela développer aussi chez nous les solutions innovantes nécessaires et également les appliquer.

En dépit de ses huit « boîtes à penser », la présente publication des académies-suisse n'entend pas seulement susciter la réflexion et la discussion, mais aussi appeler à agir rapidement et avec résolution.

Prof. Dr René Dändliker  
Président des académies-suisse



## Résumé

L'approvisionnement énergétique dans le monde et en Europe repose actuellement à raison de plus de 80% sur les combustibles et carburants carbonés. C'est avant tout leur combustion qui a fait monter la concentration du CO<sub>2</sub> de 20% pendant les cinquante dernières années. L'augmentation anthropique des gaz à effet de serre provoque un réchauffement de la planète. Rien que pendant les cinquante années passées, la température superficielle moyenne globale a augmenté de 0.6 °C. Le climat chaud de cette période est exceptionnel, du moins en comparaison des derniers mille trois cents ans. Et les modèles climatiques prévoient que la *température globale poursuivra son ascension* au cours des cent années à venir. Si le monde continue de miser principalement sur les sources d'énergie fossile, la température montera de 3.4 °C d'ici 2100 (meilleure estimation) et rapidement par la suite. Dans l'hypothèse d'un large abandon des énergies fossiles, deux scénarios, qui se distinguent par la date du démarrage de ce renoncement, concluent à une stabilisation à +1.5 °C à la fin du siècle (objectif de l'UE) ou à une hausse de 1.8 °C avec poursuite du réchauffement le siècle prochain. La montée de la température est nettement plus prononcée sur les continents. Le CO<sub>2</sub> étant un gaz à effet de serre de très longue durée de vie, les changements climatiques déjà causés se prolongeront pendant des générations sans pouvoir être corrigés. Néanmoins, des réductions des émissions permettront d'atténuer à l'avenir le réchauffement attendu ou de l'arrêter au cours de ce siècle.

Des estimations des coûts des dommages dus aux changements climatiques et d'adaptation à ces derniers ne sont disponibles que depuis peu. La progression des changements climatiques pourrait faire

croître très substantiellement ces coûts qui, en atteignant 5-20% du PIB mondial, dépasseraient alors d'un multiple les coûts d'évitement des émissions de gaz à effet de serre (environ 1% du PIB). C'est pourquoi il faut réduire les émissions globales actuelles de gaz à effet de serre d'à peu près 70% d'ici la fin du siècle. Cet objectif ne peut être atteint que si les pays industrialisés diminuent leurs rejets très bientôt et de façon drastique et que les pays émergents enrayent d'abord la croissance de leurs émissions et commencent également de les réduire d'ici deux décennies. Pour une population mondiale prévisible de 9 à 10 mia. d'habitants, les émissions par tête devraient être abaissées à environ 1 tonne de CO<sub>2</sub> par an. En comparaison, l'Inde émet aujourd'hui 1.2 et la Chine 3.1 tonnes de CO<sub>2</sub> par tête et année.

Les émissions de la Suisse représentent 1.5 pour mille des émissions globales. Ce chiffre est de 70% supérieur si l'on inclut également les « émissions grises », c'est-à-dire le CO<sub>2</sub> rejeté à l'étranger lors de la production de biens destinés à être consommés en Suisse. Par rapport aux émissions par tête, mesure significative sur le plan éthique, la Suisse se situe, avec 6 tonnes (10.7 tonnes si l'on inclut les importations), bien au-dessus de la cible à long terme de 1 tonne de CO<sub>2</sub> par personne et année. Pour atteindre une réduction d'un facteur 6 jusqu'en 2100, la Suisse devrait diminuer ses émissions de CO<sub>2</sub> au moins de 2% par an. Ces efforts de réduction ne sont pas utiles seulement à l'échelon global, mais ont aussi des avantages secondaires directs pour une région ou un pays comme la Suisse.

Au défi des changements climatiques s'ajoute un risque en matière d'approvisionnement énergétique du fait de la répartition régionalement inégale des

ressources fossiles, qui représentent aujourd'hui 80% de l'énergie primaire. Le risque géopolitique d'approvisionnement est particulièrement prononcé pour le pétrole et le gaz naturel, qui constituent 55% des agents énergétiques primaires et continuent ainsi de dominer sur les marchés mondiaux de l'énergie. Le fait que les économies les plus importantes dépendent de quelques régions, en majorité politiquement instables, recèle un risque considérable de conflits violents et de pénuries importantes d'approvisionnement.

Un autre *défi en matière d'approvisionnement* se présentera lorsque la production mondiale de pétrole et de gaz naturel reculera. Selon les experts, le pic mondial de production du pétrole conventionnel est attendu entre 2015 et 2035, et celui du gaz naturel dans la seconde moitié de ce siècle. Par la suite, l'offre de pétrole conventionnel ou de gaz diminuera. Si la demande mondiale de pétrole présente alors encore une tendance à la hausse, le prix de l'or noir et du gaz montera en flèche, car les possibilités d'éviter l'utilisation de ces agents énergétiques seront limitées à court et moyen terme. L'exploitation, qui a déjà lieu aujourd'hui, du pétrole non conventionnel (sables et schistes bitumineux) et surtout du charbon comme options de rechange, entraîne d'importantes émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub> et d'autres impacts sur l'environnement.

Pour faire face avec succès aux défis décrits ci-dessus, des *innovations* agissant en profondeur et de nouvelles solutions entrepreneuriales sont nécessaires dans les domaines suivants : l'amélioration de l'efficacité énergétique dans les conversions d'énergie ; la diminution du besoin d'énergie utile par l'amélioration et la substitution de processus ; le recyclage et l'utilisation efficace des matériaux à contenu énergétique élevé ; la substitution de matériaux par d'autres à plus faible contenu énergétique.

Réduire, à prestations comparables, la *consommation d'énergie fossile* d'un facteur six jusqu'en 2100 est le défi que la société devra relever au cours des prochaines décennies. La réalisation de cet objectif relatif à l'efficacité énergétique et à l'utilisation des matériaux se heurte aujourd'hui

moins aux possibilités techniques qu'aux valeurs et habitudes de la société et au manque d'incitations politiques. Le secteur du bâtiment doit viser des standards énergétiques spécifiques (p.ex. maison passive, Minergie-P) pour les nouvelles constructions et les rénovations. En matière de mobilité, il faut combiner de façon optimale transports publics et privés et ralentir la croissance du trafic par des mesures d'aménagement du territoire. Les émissions de CO<sub>2</sub> du parc de véhicules doivent d'abord être abaissées en harmonie avec l'UE à moins de 120 g/km et plus tard même à une valeur beaucoup plus basse. Le CO<sub>2</sub> produit par les grandes centrales électriques à gaz et à charbon devrait absolument être séquestré et stocké. Le remplacement des centrales nucléaires vieillissantes par des centrales au gaz naturel de dernière génération, signifierait une augmentation des émissions de CO<sub>2</sub> de 18%. Un renoncement à l'énergie nucléaire dans le cycle de réinvestissement aurait pour conséquence de rendre la politique climatique plus difficile. Toutefois, une partie de la population rejette l'énergie nucléaire à cause des risques auxquels elle est liée (prolifération, entreposage des déchets, accident majeur). L'objectif consistant à limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à une tonne par personne et année d'ici la fin du siècle semble pouvoir être atteint si l'on ne fait appel aux agents énergétiques fossiles que pour les utilisations les plus importantes et les plus difficiles à substituer, comme p.ex. les transports aériens ou la fabrication de certaines matières synthétiques ou d'acier brut.

Les *énergies renouvelables* constituent, à côté du perfectionnement de formes d'énergie existantes et de l'utilisation efficace de l'énergie et des biens en général, l'une des réponses centrales aux défis du futur approvisionnement énergétique. Le potentiel technique des sources d'énergie renouvelable est suffisant pour couvrir le besoin mondial d'énergie primaire. Le potentiel économiquement réalisable est pour l'heure encore sensiblement inférieur. Le recours aux énergies renouvelables n'est rentable qu'en partie dans les conditions actuelles du marché et des prix. Les coûts afférant à la fourniture de ces énergies peuvent être jusqu'à

dix fois plus élevés que pour les agents énergétiques conventionnels. Un rajustement pourrait être obtenu entre autres en tenant mieux compte des coûts externes liés à celle-ci. Mais il se fera aussi par des effets d'apprentissage et d'échelle des nouvelles technologies. Malgré tout, le recours à des sources indigènes d'énergie renouvelable ne pourra couvrir, dans les transports notamment, le besoin d'énergie que de façon limitée pendant les prochaines décennies, raison pour laquelle la Suisse continuera d'être tributaire d'importations d'énergie fossile.

*L'utilisation efficace de l'énergie et les sources d'énergie renouvelable* doivent devenir plus attractives sur le plan économique. C'est pourquoi les coûts externes devraient être mieux répercutés sur les prix de l'énergie. Les coûts externes des applications énergétiques ne sont pas seulement les coûts des dommages causés par les polluants atmosphériques classiques, les coûts du risque et des conséquences de l'énergie nucléaire et les coûts externes des énergies renouvelables, mais aussi les coûts d'adaptation aux changements climatiques et des dommages causés par ces derniers et les coûts pour s'assurer l'accès aux ressources énergétiques. Les coûts d'adaptation aux changements climatiques sont encore peu étudiés aujourd'hui ; mais ils seront considérables en Suisse dans les cantons de montagne, le long des cours d'eau du Plateau, le secteur du tourisme et l'économie énergétique.

Les *coûts externes* peuvent être pris en compte de différentes manières, par exemple par des taux d'imposition nuancés ou par la mise en place de systèmes de marché des émissions. L'inclusion des coûts externes dans les prix de l'énergie doit être accompagnée de standards techniques plus sévères, notamment dans le bâtiment et les produits de masse ; elle doit aussi comprendre des obligations et incitations en matière de réinvestissements par les propriétaires de maisons. Accroître les investissements dans l'utilisation efficace de l'énergie et

des matériaux et dans les énergies renouvelables est intéressant du point de vue de l'économie nationale, car cela favorise la création de valeur et l'emploi dans le pays et diminue les risques géopolitiques qu'il encourt.

*L'économie suisse* a, de par son savoir-faire, ses produits de haute technologie, son pouvoir d'innovation et ses remarquables établissements de formation, une influence considérable sur de futurs décideurs dans les pays industrialisés et émergents. Une condition pour maintenir cette capacité d'innovation est un haut niveau de formation. Il convient de préserver et renforcer la position, reconnue dans le monde entier, de la recherche suisse. Ces conditions favorables doivent être assurées à long terme en Suisse par une politique énergétique et climatique progressive et être utilisées à l'avantage de l'économie.

Nombre de solutions techniques et entrepreneuriales possibles et leur encouragement par des mesures politiques soulèvent la question de leur *acceptation par la société*. La prise de conscience que des conditions-cadres efficaces en politique énergétique et climatique sont nécessaires pour éviter les dommages prévisibles s'est certes nettement renforcée ces derniers temps. Il faut néanmoins que l'État, la science et la société civile intensifient leur travail de formation et d'information afin que cette prise de conscience se traduise en changements durables du comportement individuel et des conditions-cadres politiques.

La question de l'énergie et du climat révélera avec quel degré d'efficacité un système social basé sur l'économie de marché est en mesure de corriger, en modifiant les *conditions-cadres*, les évolutions négatives qu'il a lui-même induites en matière de consommation des ressources. Vu le caractère global de la question, il faut des conditions-cadres efficaces, incitant à agir dans l'immédiat, et à tous les niveaux : communes, cantons, Confédération, et à l'échelon multinational.



## Zusammenfassung

Die Energieversorgung basiert derzeit global und in Europa zu mehr als 80% auf kohlenstoffhaltigen Brenn- und Treibstoffen. Vorwiegend durch deren Verbrennung ist die Konzentration des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in den letzten 50 Jahren um 20% angestiegen. Die vom Menschen gemachte Zunahme an Treibhausgasen führt zu einer globalen Erwärmung. Die mittlere globale Oberflächentemperatur hat allein in den vergangenen fünfzig Jahren um 0.6 °C zugenommen. Das warme Klima ist in diesem Zeitraum, zumindest im Vergleich mit den letzten 1300 Jahren, aussergewöhnlich. Für die kommenden 100 Jahre sagen die Klimamodelle einen weiteren erheblichen *globalen Temperaturanstieg* voraus. Setzt die Welt weiterhin primär auf fossile Energiequellen, steigt die Temperatur bis 2100 um 3.4 °C (beste Schätzung) und danach rasch weiter. Bei weitgehender Abkehr von fossilen Energiequellen in den nächsten 50 Jahren wäre eine Stabilisierung bis zum Ende des Jahrhunderts auf +1.5 °C realisierbar. Der Temperaturanstieg ist auf dem Festland der Kontinente bedeutend grösser. Da CO<sub>2</sub> ein sehr langlebiges Treibhausgas ist, ist die bereits verursachte Klimaänderung über Generationen hinweg nicht korrigierbar. Emissionsreduktionen können jedoch die zukünftig erwartete Erwärmung dämpfen oder im Laufe dieses Jahrhunderts stoppen.

Erst seit kurzem sind Schätzungen der Schadens- und Anpassungskosten der Klimaänderung verfügbar. Diese Kosten könnten mit fortschreitender Klimaänderung erheblich wachsen und mit 5–20% des weltweiten BIP die Kosten zur Vermeidung von Treibhausgasemissionen (etwa 1% des BIP) um ein Mehrfaches übersteigen. Erforderlich ist deshalb eine globale Reduktion der Treibhausgasemissionen

bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa 70% des heutigen Ausstosses. Dieses Ziel ist nur erreichbar, wenn die Industrieländer ihren Ausstoss sehr bald und erheblich verringern und die Schwellenländer den Zuwachs ihrer Emissionen zunächst eindämmen und binnen zwei Jahrzehnten ihre Emissionen ebenfalls zu reduzieren beginnen. Bei einer absehbaren Weltbevölkerung von 9 bis 10 Mrd. müssten die Pro-Kopf-Emissionen auf etwa 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Jahr sinken. Zum Vergleich: Indien und China emittieren heute 1.2 bzw. 3.1 Tonnen CO<sub>2</sub> pro Kopf und Jahr.

Die Emissionen der Schweiz betragen 1.5 Promille der globalen Emissionen. Rechnet man die «grauen Emissionen» hinzu, also den CO<sub>2</sub>-Ausstoss, der im Ausland bei der Produktion von Gütern entsteht, die für den Konsum in der Schweiz bestimmt sind, liegt die Zahl um 70% höher. Beim ethisch relevanten Mass der Pro-Kopf-Emissionen liegt die Schweiz mit 6 Tonnen (10.7 Tonnen mit Importen) deutlich über der langfristigen Zielgrösse von etwa 1 Tonne CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr. Um bis 2100 eine Reduktion um einen Faktor 6 zu erreichen, müsste die Schweiz die CO<sub>2</sub>-Emissionen jährlich um mindestens 2% reduzieren. Diese Reduktionsanstrengungen bringen nicht nur globalen Nutzen, sondern haben auch direkte sekundäre Vorteile für eine Region oder ein Land wie die Schweiz.

Neben der Herausforderung durch die Klimaänderung besteht ein Risiko in der Energieversorgung wegen der regional ungleichen Verteilung der fossilen Ressourcen, die heute 80% der Primärenergie ausmachen. Besonders ausgeprägt ist das damit verbundene geopolitische Versorgungsrisiko beim Erdöl und Erdgas, welche mit einem Weltmarktanteil an den Primärenergieträgern von 55% die glo-

balen Energiemärkte nach wie vor dominieren. Die Abhängigkeit der bedeutendsten Volkswirtschaften von einigen wenigen, mehrheitlich politisch instabilen Regionen birgt erhebliche Risiken für gewaltsame Konflikte und gravierende Versorgungslücken.

Eine weitere *versorgungsseitige Herausforderung* kommt hinzu, wenn die weltweite Fördermenge an Erdöl und Erdgas zurückgeht. Fachleute erwarten das weltweite Fördermaximum konventionellen Erdöls zwischen 2015 und 2035 und von Erdgas in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts. Ab diesen Zeitpunkten wird das verfügbare Angebot von konventionellem Erdöl bzw. Erdgas abnehmen. Nimmt die Weltölnachfrage zu diesem Zeitpunkt noch zu, dann steigen der Erdöl- und der Erdgaspreis in erheblichem Umfang, weil die Ausweichmöglichkeiten bei der Nutzung kurz- und mittelfristig beschränkt sind. Das bereits stattfindende Ausweichen auf unkonventionelle Öle (Teersande und Ölschiefer) und besonders auf Kohle ist mit grossen zusätzlichen CO<sub>2</sub>-Emissionen und anderen Umweltauswirkungen verbunden.

Um den beschriebenen Herausforderungen erfolgreich zu begegnen, sind tief greifende *Innovationen* und neue unternehmerische Lösungen in den folgenden Bereichen nötig: Verbesserung der Energieeffizienz im Bereich der Energiewandlung; Verminderung des Nutzenergiebedarfes durch Prozessverbesserungen und -substitutionen; verstärktes Recycling und verbesserte Einsatzeffizienz energieintensiver Materialien; Substitution von Werkstoffen und Materialien durch weniger energieintensive Werkstoffe.

Den *Verbrauch fossiler Energie* bis 2100 um einen Faktor sechs bei vergleichbaren Dienstleistungen zu reduzieren, ist die gesellschaftliche Herausforderung der kommenden Jahrzehnte. Diese Vision der Energie- und Materialeffizienz scheitert heute weniger an den technischen Möglichkeiten als an gesellschaftlichen Wertvorstellungen, Gewohnheiten und fehlenden politischen Anreizen. Im Bausektor sind bei Neubauten und Gebäudeerneuerungen je spezifische Energie-Standards (z. B. Passivhaus, Minergie-P) anzustreben.

Beim Verkehr müssen öffentlicher und Privatverkehr optimal kombiniert werden, und das Verkehrswachstum ist durch geeignete Raumplanung zu dämpfen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen der Fahrzeugflotte sind im Einklang mit der EU vorerst auf weniger als 120 g/km zu reduzieren und mittelfristig auf bedeutend tiefere Werte. Bei grossen Gas- und Kohlekraftwerken für die Stromerzeugung müsste das CO<sub>2</sub> zwingend abgetrennt und gespeichert werden. Der Ersatz der alternden Kernkraftwerke durch beste Gaskraftwerke würde den CO<sub>2</sub>-Ausstoss um 18% erhöhen. Ein Verzicht auf die Kernenergie im Re-Investitionszyklus wird die Klimapolitik zusätzlich erschweren. Allerdings findet die Kernenergie wegen der Probleme, die sie mit sich bringt (Proliferation, Endlagerung, maximaler Störfall) bei einem Teil der Bevölkerung keine Akzeptanz. Das Ziel einer Emission von einer Tonne CO<sub>2</sub> pro Person und Jahr am Ende dieses Jahrhunderts erscheint erreichbar, wenn fossile Energieträger nur noch für die wichtigsten, am schwersten substituierbaren Nutzungen wie z. B. den Flugverkehr oder die Herstellung bestimmter Kunststoffe oder Rohstahl verwendet werden.

Die *erneuerbaren Energien* sind neben der Weiterentwicklung bestehender Energieformen und der effizienten Nutzung von Energie und Gütern allgemein eine der zentralen Antworten auf die Herausforderungen der zukünftigen Energieversorgung. Das technische Potenzial der erneuerbaren Energiequellen ist ausreichend zur Deckung des weltweiten Primärenergiebedarfs. Das ökonomisch realisierbare Potenzial ist derzeit noch bedeutend geringer. Die Nutzung der erneuerbaren Energien ist unter den heutigen Markt- und Preisbedingungen nur teilweise wirtschaftlich. Die Kosten für die Bereitstellung können bis zu zehnmal höher sein als bei der Nutzung konventioneller Energieträger. Eine Angleichung liesse sich unter anderem durch eine angemessene Berücksichtigung der mit der Nutzung verbundenen externen Kosten erreichen. Sie wird aber auch durch weitere Lern- und Skaleneffekte der neuen Technologien stattfinden. Gleichwohl wird die Nutzung einheimischer erneuerbarer Energiequellen in den nächsten Jahrzehnten den

Energiebedarf vor allem im Verkehr nur beschränkt decken können, weshalb die Schweiz weiter auf fossile Energieimporte angewiesen sein wird.

Die *effiziente Energienutzung und erneuerbare Energiequellen* müssen ökonomisch attraktiver werden. Deshalb sollten sich die externen Kosten stärker in den Energiepreisen widerspiegeln. Externe Kosten der Energieanwendung sind dabei nicht nur die Schadenskosten herkömmlicher Luftschadstoffe, die Risiko- und Folgekosten der Kernenergie und die externen Kosten der erneuerbaren Energiequellen, sondern auch die durch die Klimaänderung verursachten Anpassungs- und Schadenskosten und die Kosten zur Sicherung des Zugangs zu den Energieressourcen. Die Anpassungskosten an den Klimawandel sind heute noch wenig untersucht; sie werden aber für die Schweiz in den Gebirgskantonen, entlang von Gewässern im Mittelland, im Tourismus und in der Energiewirtschaft erheblich sein.

*Externe Kosten* können in verschiedener Weise berücksichtigt werden, etwa durch differenzierte Steuersätze oder die Einrichtung von Emissionshandelssystemen. Der Einbezug der externen Kosten in die Energiepreise muss flankiert werden durch strengere technische Standards, insbesondere im Bausektor und bei Massenprodukten, sowie durch Verpflichtungen und Anreize für Hausbesitzer für ihre Re-Investitionen. Mehr Investitionen in Energie- und Materialeffizienz sowie in erneuerbare Energieträger sind auch volkswirtschaftlich interessant, denn sie fördern die inländische Wertschöpfung und Beschäftigung und vermindern geopolitische Risiken für die Schweiz.

Die *Schweizer Wirtschaft* hat aufgrund ihres Know-hows, ihrer High-tech-Produkte, ihrer Inno-

vationskraft sowie ihrer hervorragenden Ausbildungsstätten einen erheblichen Einfluss auf zukünftige Entscheidungsträger in Industrie- und Schwellenländern. Voraussetzung für den Erhalt dieser Innovationskraft ist ein *hervorragender Bildungsstandort*. Die weltweit anerkannte Stellung der Schweizer Forschung gilt es zu wahren und zu stärken. Diese günstigen Voraussetzungen sollen langfristig durch eine fortschrittliche Energie- und Klimapolitik in der Schweiz abgesichert und zum wirtschaftlichen Vorteil genutzt werden.

Viele der denkbaren technischen und unternehmerischen Lösungsmöglichkeiten und deren Förderung durch politische Massnahmen werfen Fragen ihrer *gesellschaftlichen Akzeptanz* auf. Das Bewusstsein für die Notwendigkeit wirksamer energie- und klimapolitischer Rahmenbedingungen zur Vermeidung der antizipierten Schäden ist in der jüngsten Zeit zwar deutlich gestiegen. Dennoch bedarf es verstärkter Bildungs- und Informationsarbeit seitens des Staates, der Wissenschaft und der Zivilgesellschaft, um dieses Bewusstsein in dauerhafte Veränderungen des persönlichen Verhaltens und der politischen Rahmenbedingungen zu überführen.

An der Energie- und Klimathematik wird sich zeigen, wie wirkungsvoll das auf freier Marktwirtschaft basierende Gesellschaftssystem in der Lage ist, die selbst induzierten Fehlentwicklungen im Ressourcenverbrauch durch Veränderungen der Rahmenbedingungen zu korrigieren. Wegen des globalen Charakters braucht es wirksame, zum sofortigen Handeln anregende, *politische Rahmenbedingungen* auf allen Ebenen: Gemeinden, Kantone, Bund und multinational.



## Summary

Currently, carbon-based fuels account for more than 80% of energy supplies in Europe and worldwide. Due to the burning of these fossil fuels, concentrations of the greenhouse gas CO<sub>2</sub> have risen by 20% over the past 50 years. The anthropogenic increase in greenhouse gases leads to global warming. In the last 50 years only, the mean global surface temperature has risen by 0.6 °C. The warm climate observed over this period is unusual, at least compared with the previous 1300 years. For the next 100 years, climate models predict a substantial further *rise in global temperatures*. If the world continues to rely primarily on fossil energy sources, the temperature will rise by 3.4 °C (best estimate) by 2100, and rapidly thereafter. If fossil energy sources are largely abandoned, two hypothetical climate scenarios – based on different phase-out times – suggest stabilization at +1.5 °C (EU target) by the end of the century or an increase of 1.8 °C with further warming occurring in the next century respectively. In continental inland regions the temperature increase is considerably higher. Because CO<sub>2</sub> is a very persistent greenhouse gas, the climate change that has already arisen cannot be reversed for several generations. However, in the course of this century the expected future warming can be mitigated or stopped by emission reductions.

The damage costs associated with climate change and costs of adaptation measures have only recently been estimated. As climate change intensifies, these costs could increase to 5–20% of global GDP and thus be many times higher than the costs of avoiding greenhouse gas emissions (approx. 1% of GDP). For this reason, greenhouse gas emissions need to be reduced globally by about 70% below current

levels by the end of this century. This target is only achievable if industrialized countries cut their emissions dramatically and very rapidly. Furthermore, emerging economies need to limit the increase in emissions and then also start to reduce their emissions within the next two decades. Expecting a global population of 9–10 billion, per capita emissions would need to decrease to around 1 tonne of CO<sub>2</sub> per year. For comparison, India and China currently emit 1.2 and 3.1 tonnes of CO<sub>2</sub> per person per year respectively.

Switzerland's emissions currently account for 1.5 per mille of the global total amount. If "embedded" emissions are also included, i.e. CO<sub>2</sub> emissions abroad associated with the production of goods intended for consumption in Switzerland, the Swiss portion is 70% higher. Considering the ethically relevant measure of per capita emissions, Switzerland's current output of 6 tonnes per person per year (10.7 tonnes including imports) is clearly above the long-term target of around 1 tonne of CO<sub>2</sub>. To achieve a reduction to the sixth part of today's CO<sub>2</sub> emissions by 2100, in Switzerland an annual reduction by at least 2% would be required. For a region or country like Switzerland, these reduction efforts not only provide global benefits but also offer direct secondary benefits.

Apart from the challenges posed by climate change, risks related to energy supply arise from the unequal regional distribution of fossil fuel resources, which currently account for 80% of primary energy. The geopolitical supply risk is particularly distinct in the case of oil and gas, which continue to dominate global energy markets, with a 55% share of the primary fuel market. The dependency of major

economies on a small number of mostly politically unstable regions involves a substantial risk of violent conflicts.

An additional *supply-side challenge* will arise from a decline in global oil and gas production. Experts expect global production of conventional oil to peak between 2015 and 2035, and gas production to peak in the second half of this century. Thereafter, available supplies of conventional oil and gas will decrease. If global demand for oil is still rising at that point, then oil and gas prices will increase sharply, as alternative options remain limited in the short to medium term. Switchovers to non-conventional oil (tar sands and oil shale) and particularly coal, which already occur, give rise to substantial additional CO<sub>2</sub> emissions and other environmental impacts.

To successfully meet these challenges will require radical *innovations* and new corporate solutions in the following areas: improving the efficiency of energy conversion; reducing energy demand through improved and alternative processes; increasing recycling and improving efficiency in the use of energy-intensive materials; replacing materials and substances with less energy-intensive alternatives.

The challenge that society needs to face in the decades ahead is to reduce the *consumption of fossil energy* to the sixth part by 2100 while maintaining services at a comparable level. Today, this vision is thwarted not so much by a lack of technical possibilities as by society's ideals and habits, and a lack of political incentives. The construction sector should aim at adopting specific energy standards (e.g. passive house, "Minergie-P") for new buildings and renovations. In the transport sector, public and private modes need to be optimally combined, and traffic growth should be controlled by appropriate spatial planning. CO<sub>2</sub> emissions from private vehicles should firstly be reduced to less than 120 g/km in line with EU targets and later to much lower values. At gas- and coal-fired power plants, it would be essential to capture and sequester CO<sub>2</sub> emissions. To replace aging nuclear power plants by gas-fired power plants of the latest standard would increase

CO<sub>2</sub>-emissions by 18%. An abandonment of nuclear power plants will complicate climate policy additionally. However, nuclear energy does not find approval by part of the population due to the problems involved (nuclear proliferation, disposal, maximum hazardous incident). The goal of reducing CO<sub>2</sub> emissions to 1 tonne per person per year by the end of the century appears to be attainable if the use of fossil fuels is restricted to the most important applications where substitution is most difficult, e.g. aviation or the production of certain plastics or crude steel.

In addition to the further development of existing forms of energy and to the efficient use of energy and goods in general, *renewable energy resources* are one of the key answers to the challenges of securing future energy supplies. The technical potential of renewable energy resources is sufficient to meet global primary energy demands. At present, the economically practicable potential remains much lower. Although the use of renewables under current market and pricing conditions is in some cases already economically viable, from a business perspective the costs may still be up to ten times higher than with the use of conventional fuels. This difference could be reduced, for example, by giving due consideration to the external costs associated with consumption. However, the costs of the new technologies will also fall as the learning curve and economies of scale take hold. Even so, the extent to which energy demand, especially in the transport sector, can be met by domestic renewables will be limited in the coming decades, and Switzerland will consequently continue to be reliant on imports of fossil energy.

*Energy efficiency and renewable sources of energy* ought to become more attractive economically. Therefore, energy prices should reflect external costs comprehensively. External costs of energy use do not only include the costs of damage caused by classical air pollutants, the risk-related and legacy costs of nuclear power, and the external costs of renewables, but also the costs of damage and adaptation associated with climate change and the costs of securing access to energy resources. The costs of adapting to climate change have been little studied

to date. For Switzerland, they will be considerable in the mountainous cantons and in the tourism and energy sectors.

*External costs* can be taken into account in various ways, e.g. by differential taxation or the establishment of emission trading systems. The inclusion of external costs in energy pricing needs to be accompanied by more stringent technical standards, especially in the construction sector and for mass products, and also by obligations and incentives for property owners to reinvest. Investments in energy efficiency, material-use efficiency and in renewable energy resources are also economically attractive as they stimulate domestic value creation and employment and reduce geopolitical risks for Switzerland.

Because of its expertise, high-tech products, innovativeness and outstanding training facilities, *Swiss industry* exerts a considerable influence on future decision-makers in industrialized and emerging nations. A prerequisite for the maintenance of Switzerland's innovativeness is an *outstanding education sector*. The globally recognized status of Swiss research needs to be preserved and enhanced.

In the long term, this favourable environment should be reinforced by a progressive energy and climate policy in Switzerland and turned to economic advantage.

Many conceivable technical and corporate solutions – and political measures designed to promote them – raise questions of *acceptability to society*. Although recently the awareness of the need for an effective energy and climate policy framework to avoid anticipated damage has risen, increased education and communication efforts are required on the part of the state, the private sector and civil society in order to translate this consciousness into permanent changes in individual behaviour and the *political framework*.

The energy and climate issue will demonstrate to what extent a social system based on free-market economics is capable of correcting self-induced aberrations in resource use by changing the background conditions. Given the global nature of the problem, there is a need for an effective political framework stimulating immediate action at all levels – municipal, cantonal, federal and international.



## Défis de l'utilisation de l'énergie et de l'approvisionnement énergétique dans le futur

L'économie énergétique des pays industrialisés, émergents et en développement devra faire face à long terme à d'énormes défis en raison de sa forte dépendance des agents énergétiques fossiles. Premièrement, la combustion d'agents énergétiques fossiles est la cause de changements climatiques qui ont déjà commencé à se faire sentir. Deuxièmement, des risques géopolitiques résultent de la concentration des ressources fossiles liquides et gazeuses dans des régions politiquement instables, de leur transport au moyen d'infrastructures hautement vulnérables et du déséquilibre prononcé de leur utilisation dans le monde. Troisièmement, les prix de l'énergie grimperont dans une mesure impossible à estimer lorsque le pic de production du pétrole et du gaz sera atteint.

### Les changements climatiques – un des plus grands défis en matière d'utilisation de l'énergie et d'approvisionnement

La consommation d'énergie dans le monde et en Europe repose actuellement à raison d'environ 80% sur les combustibles carbonés. Leur combustion accroît la concentration du CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère de quelque 2 ppm par année. Au cours des cinquante dernières années, cette concentration a augmenté de 20% et a atteint maintenant (printemps 2007) 384 ppm. *Du fait de cette rapide hausse de la concentration, la température globale moyenne à la surface de la Terre est montée de bien 0.6 °C rien que pendant les cinquante années passées (1955–2005). Un réchauffement aussi rapide ne s'est jamais produit pendant les derniers mille ans.* Le réchauffement varie selon la région ; il est en général plus élevé au-dessus des terres émergées et plus faibles au-dessus des océans. En Suisse, la hausse moyenne de la température des cinquante dernières années se monte à 1.6 °C. Elle est donc plus forte que la moyenne des terres émergées de

l'hémisphère Nord et comparable au réchauffement en Scandinavie.

Pour les cent années à venir, les *modèles climatiques* prévoient une hausse globale de la température encore plus considérable (fig. 1-1 et fig. 1-2). Si le monde continue de miser en premier lieu sur les sources d'énergie fossiles (scénario A2), la température montera jusqu'en 2100 de 3.4 °C par rapport à 1990 (meilleure estimation), et cette augmentation se poursuivra ensuite à un rythme élevé. Si l'on parvient à se passer dans une large mesure des sources énergétiques fossiles d'ici la fin du siècle (objectif de l'UE dans la fig. 1-2), les scénarios climatiques indiquent un réchauffement global de 1.5 °C avec stabilisation ou pour le scénario moins ambitieux B1 un réchauffement de 1.8 °C avec tendance à la hausse. La montée de la température est nettement plus importante sur les continents. Etant donné que le CO<sub>2</sub> séjourne des centaines, et en partie même jusqu'à des centaines de milliers d'années dans l'atmosphère les efforts de réduction des émissions n'auront un effet climatique perceptible qu'une fois les émissions absolues fortement réduites par rapport à aujourd'hui. Même pour

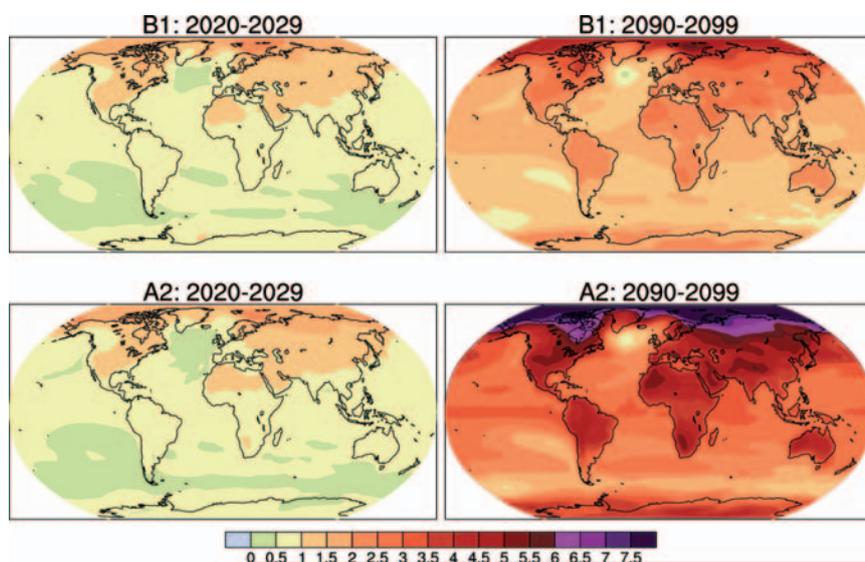


Fig. 1-1 : Réchauffement climatique par rapport à 1990 pour deux scénarios d'émission : le scénario B1 (en haut, cf. glossaire) pré-suppose l'abandon des agents énergétiques fossiles au profit de technologies connues et prévisibles et en coopération mondiale ; le scénario A2 (en bas) admet un monde hétérogène à économie régionaliste (business as usual). Pendant la période de 2020 à 2030, les effets ne diffèrent guère, en dépit des mesures très différentes appliquées dès le début (colonne de gauche). Celles-ci ne se font sentir que pendant la seconde moitié du siècle (colonne de droite). [GIEC 2007a]

l'ambitieux scénario B1, cela n'est le cas que dans la seconde moitié du siècle.

Les changements climatiques modifient les situations météorologiques : en été, l'anticyclone des Açores s'étendra plus fréquemment au-dessus de toute l'Europe, et en hiver, les trajectoires des zones de basse pression se déplaceront vers le nord et se renforceront éventuellement [GIEC 2007a]. Les changements climatiques modifieront aussi la structure des précipitations à l'échelon régional, et la fréquence d'événements extrêmes, tels que les fortes tempêtes ou les vagues de chaleur, augmentera globalement [GIEC 2007a]. En parallèle, le coût des dommages montera (voir le paragraphe sur les coûts d'adaptation et des dommages).

Les projections climatiques à petite échelle, comme dans le cas de la Suisse qui est géographiquement fortement structurée, comportent des incertitudes. Les modèles et la compréhension physique des processus rendent toutefois plausibles une continuation des tendances observées. Les températures moyennes seront à la hausse en Suisse à toutes les saisons. La pluviométrie moyenne croîtra pendant le semestre d'hiver et diminuera pendant celui d'été [Occc/ProClim].

En l'absence d'une diminution substantielle des émissions de gaz à effet de serre, un été moyen serait

en Suisse aussi chaud (fig. 1-3) et sec que l'été caniculaire de 2003 [Schär et al. ; Scherrer et al.]. Les vagues de chaleur et les sécheresses feraient partie de la normalité et il est probable que les violents ouragans seraient nettement plus fréquents dans l'Atlantique. Les analyses indiquent un accroissement des valeurs extrêmes en matière de précipitation en Europe centrale pendant le semestre d'hiver. La situation est moins claire en été. Bien que les modèles de simulation fassent apparaître une diminution prononcée des précipitations d'été moyennes, les calculs indiquent une légère augmentation des valeurs extrêmes [Occc/ProClim]. Un accroissement de l'intensité et des extrêmes des précipitations et un recul des zones de pergélisol recèlent le potentiel de crues, glissements de terrain et laves torrentielles plus fréquents [Occc/ProClim]. Le tourisme d'hiver dans les Alpes serait condamné dans les domaines skiabiles actuels à basse altitude et une grande partie des glaciers devrait, dans une large mesure, avoir fondu d'ici le milieu du siècle [Zemp et al]. Du fait que moins d'eau sera stockée sous forme de neige, l'écoulement saisonnier changera : il sera plus important au printemps et moindre en été.

Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la consommation d'énergie représentent en gros 60% de l'en-

semble des gaz à effet de serre anthropiques. Du fait de sa prédominance et de son séjour prolongé dans l'atmosphère, le CO<sub>2</sub> prend une importance essentielle. Le méthane, qui fait 20% des émissions, vient au second rang des gaz à effet de serre ; il est produit dans l'agriculture et l'élevage industriel. Le méthane a une durée de vie relativement courte, il n'a plus d'effet si l'on considère des périodes de plus de cent ans. À l'avenir, les émissions de méthane dues au dégel du pergélisol devraient cependant aggraver le problème climatique, car elles ne pourront pas être arrêtées. C'est pourquoi le plus urgent est de réduire le recours aux énergies fossiles.

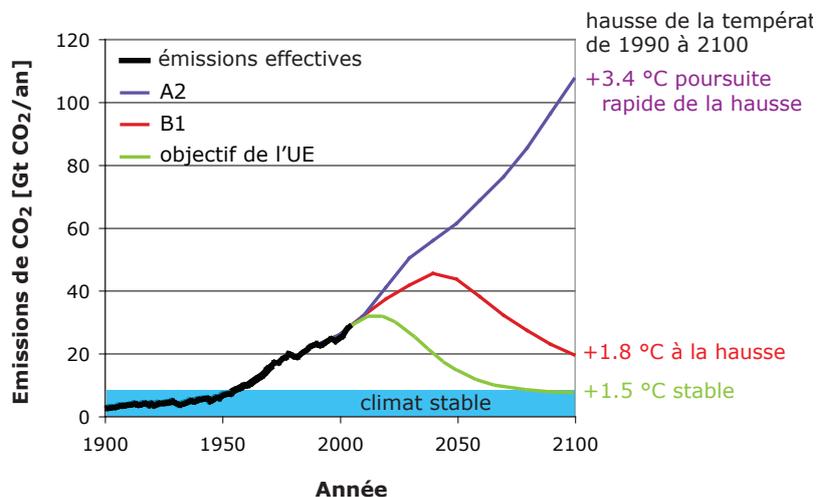
### Réduire rapidement les gaz à effet de serre

Pour finalement arrêter les changements climatiques anthropiques, il faut réduire d'environ 70% les émissions mondiales actuelles de gaz à effet de serre, lesquelles descendraient alors à 10 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub> (fig. 1-2). La température d'équilibre atteinte – qu'elle soit de +2 °C ou de +6 °C – dépend en revanche en premier lieu du taux de diminution des émissions jusqu'à ces 10 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub>. Pour ne pas dépasser les +1.5 °C exigés par l'UE (respectivement +2 °C par rapport aux températures préindustrielles), il faudra commencer à réduire les émissions globales déjà à partir de 2015 environ (ce qui correspond à la catégorie I dans [GIEC 2007c]).

À elles seules déjà, les 16 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub> émises par les pays industrialisés, qui comptent environ 1 mia. d'êtres humains, se situaient en 2003 bien au-dessus du niveau exigé. Les émissions des pays émergents et en développement, de 11 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub> en 2003, avec rapide tendance à la hausse, sont aussi déjà au-dessus du niveau requis, toutefois, elles sont produites par quelque 5.5 mia. d'êtres humains. Même si les émissions annuelles mondiales pouvaient être stabilisées aux 27 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub> rejetées en 2003, ce qui n'est pas le cas jusqu'à maintenant, la température moyenne monterait pendant ce siècle de 2 °C à la surface du globe et de plus de 3 °C au-dessus des continents et continuerait ensuite d'augmenter rapidement.

Les réductions d'émissions drastiques mais nécessaires dans les pays industrialisés doivent donc être complétées par des mesures permettant d'améliorer l'efficacité et par un recours maximal aux énergies renouvelables aussi dans les pays émergents et en développement. Dans de nombreux pays, le rayonnement solaire intense et les bonnes conditions de vent offrent une chance de raccourcir l'ère fossile et de recourir d'emblée à l'énergie solaire et éolienne. Il est inadmissible que des technologies désuètes soient refilées à ces pays, comme cela se fait souvent aujourd'hui. L'approvisionnement et l'utilisation énergétiques sans CO<sub>2</sub> constituent ainsi un des grands défis de l'économie énergétique mondiale.

Fig. 1-2 : Pour stabiliser la température, les émissions devraient être réduites globalement d'environ 70% à 10 mia. de tonnes de CO<sub>2</sub>. Ceci serait faisable en recourant en coopération mondiale à des technologies connues et prévisibles. Pour une évolution des émissions selon le scénario B1, la température augmente jusqu'en 2100 de 1.8 °C (meilleure estimation), pour celle selon l'objectif de l'UE de 1.5 °C (correspond au scénario GIEC I). L'accroissement mondial actuel des émissions est encore plus prononcé que dans le scénario A2 (cf. glossaire) [ProClim, selon GIEC 2007a,c].



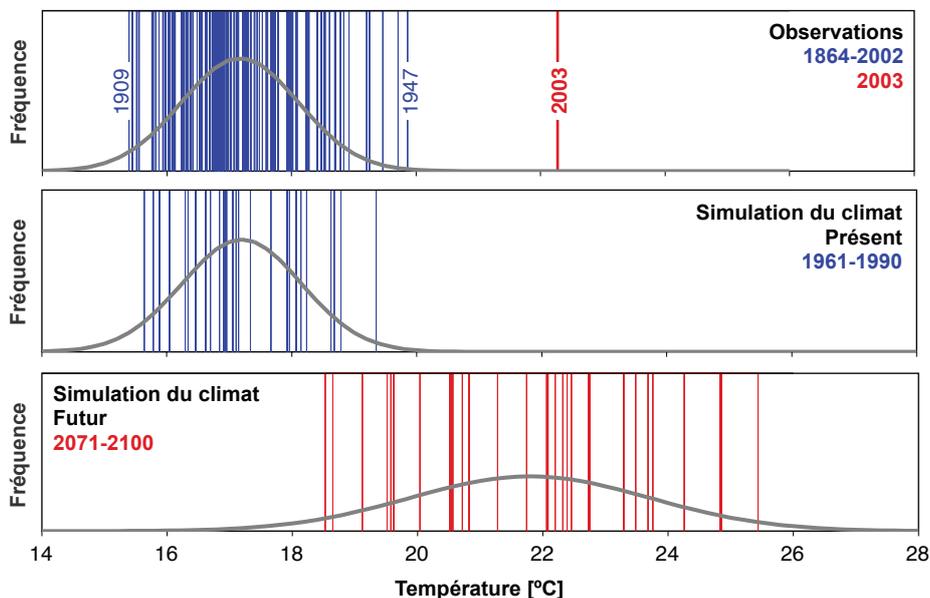


Fig. 1-3 : Températures annuelles d'été moyennes (traits verticaux) et distribution de probabilité calculée sur cette base (courbe de Gauss). En haut : valeurs observées (1864–2002) ; au milieu : résultat d'un modèle climatique régional pour la Suisse dans les conditions actuelles (1961–1990) ; en bas : ce résultat pour les années 2071–2100, dans l'hypothèse que l'on continue de miser avant tout sur les agents énergétiques fossiles (scénario GIEC A2). Un été moyen correspondra dans cent ans à peu près à l'été caniculaire de 2003, et la variabilité d'un été à l'autre augmentera [Schär 2004].

### Coûts d'adaptation aux changements climatiques et des dommages causés par ces derniers

Pendant ces dernières années, les coûts des dommages provoqués par les intempéries ont nettement augmenté dans le monde entier [EEA, Swiss Re]. Vu que d'autres facteurs s'ajoutent à ceci, tels que la concentration dans les agglomérations urbaines, le stock de capital en constante augmentation et la densité d'assurance, il n'est pas facile de démontrer statistiquement le rapport entre l'accroissement des coûts des dommages et les changements climatiques. En outre, et en particulier pour un petit espace tel que la Suisse, des tendances ne peuvent pas être déduites sans ambiguïté des événements extrêmes, du fait de la rareté de ces derniers. Le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) s'attend à une augmentation particulièrement rapide des dommages dans le monde si le climat change à un rythme élevé [GIEC 2007b, c].

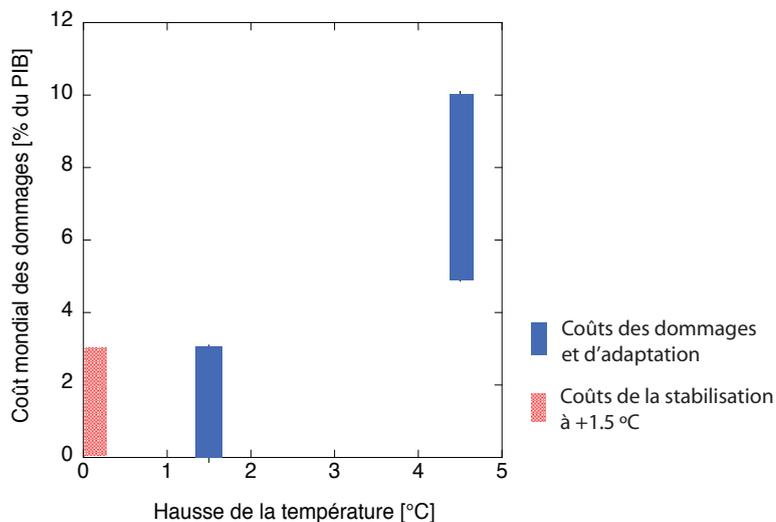
Partant des observations sur les intempéries, des calculs à l'aide de modèles climatiques régionaux et du modèle de dommages de Swiss Re confirment l'hypothèse d'une augmentation d'origine climatique des dommages [Schwierz et al]. Selon ces

modélisations, les dommages des tempêtes d'hiver en Europe, qui à eux seuls se montent aujourd'hui à 4.1 mia. de francs en moyenne, devraient augmenter de 40% jusqu'à la fin du siècle ; en Allemagne du Nord, cette augmentation serait même de 100%.

Des analyses de l'évolution globale des coûts (fig. 1-4) montrent qu'une stabilisation de la température globale à moins de +1.5 °C entraînerait des coûts entre 0 et 3% du produit intérieur brut (PIB) mondial [GIEC 2007c]. (Le rapport Stern, l'UE et le GIEC 2007c indiquent une hausse par rapport à la température préindustrielle, soit +2 °C). Tout retard augmenterait les coûts pour atteindre l'objectif de +1.5 °C, vu que plus tard, les émissions devront être réduites beaucoup plus rapidement.

Pour un climat stabilisé à +1.5 °C, les coûts des dommages et d'adaptation sont estimés à moins de 3% du PIB [Stern]. Sans réductions conséquentes des émissions, les températures globales pourraient dépasser +4.5 °C et causer des dommages pour un montant de 5–10% du PIB [Stern]. Si des événements inattendus survenaient en plus, tels que par exemple un affaiblissement rapide du Gulf Stream, ou si l'on inclut des dommages non pécuniaires, le coût des dommages au niveau d'une augmentation de la température de +4.5 °C pourrait monter à 20%

Fig. 1-4 : Coûts estimés des dommages et d'adaptation (en bleu) en fonction du niveau auquel la température peut être stabilisée. Les coûts augmentent rapidement si l'on ne parvient pas à limiter la hausse globale de la température à 1.5–2 °C. Les coûts de stabilisation de la température (en rouge), de 0 à 3% du PIB, sont comparativement faibles [Stern 2006, IPCC 2007c].



du PIB (ce qui n'est pas indiqué dans la fig. 1-4). À titre de comparaison : la totalité du système énergétique d'un État industrialisé représente environ 8% du PIB.

Les réductions mondiales des émissions diminuent en premier lieu les coûts des dommages et d'adaptation. Mais elles présentent également des *avantages supplémentaires* qui ne concernent pas directement le climat [Occc 2000]. De tels avantages supplémentaires se présentent par exemple sur le plan sanitaire : elles entraînent une diminution de la pollution atmosphérique et de ce fait aussi le cas des maladies cardiovasculaires et respiratoires y relatifs et de leurs coûts. Le transfert des transports individuels vers les transports en commun diminuera aussi les blessures dues aux accidents de la route, pour autant qu'il réduise effectivement le nombre de kilomètres parcourus par la totalité des transports motorisés.

### Coûts d'adaptation en Suisse prévisibles dans vingt à quarante ans

La Suisse a une longue tradition d'adaptation aux dangers naturels. Elle a aussi les moyens financiers et le savoir-faire technique pour maîtriser les adaptations et impacts prévisibles pendant les prochaines décennies [Occc/ProClim]. Les

coûts d'adaptation de bâtiments ou de centrales thermoélectriques sont toutefois considérables, car ces objets sont construits pour une durée de vie de plusieurs décennies. Alors que le besoin de chauffage diminuera en hiver jusqu'en 2050 (-15% par rapport à 1984–2004), la demande en refroidissement augmentera en été d'environ 150% [Aebischer et al]. S'ensuivra un accroissement des exigences relatives à l'enveloppe des bâtiments (p.ex. protection passive contre le soleil), du besoin en ventilation et climatisation des locaux et du besoin en refroidissement des centrales thermiques. Les coûts d'adaptation pour protéger des bâtiments administratifs et utilitaires existants contre une montée excessive de la température intérieure sont estimés pour la Suisse, pour les trente années à venir, à environ 1 mia. de francs par an ou 0.2% du PIB [Jakob et al].

En ce qui concerne le système énergétique de la Suisse, les coûts d'adaptation au réchauffement climatique n'ont encore guère fait l'objet d'un examen. Les premières estimations montrent que le besoin en électricité pourrait croître de plus de 4% jusqu'en 2035, principalement en raison du recours accru à la climatisation et réfrigération [BFE a, b]. Les centrales au fil de l'eau produiront moins d'électricité à cause de la faiblesse ou de l'excès du débit des cours d'eau. Les lignes à haute tension



et autres infrastructures exposées devraient être contrôlées en permanence eu égard à de nouvelles menaces, telles que des tempêtes plus violentes ou des pentes devenues instables à la suite du dégel du pergélisol.

À court terme, les conditions d'enneigement pourront être assurées dans les stations de sport d'hiver en investissant dans des canons à neige (1 mio. de francs d'investissement par km de piste, plus 50 000 Fr. par an de frais d'exploitation) [CIPRA]. Ceci donne aux lieux touristiques du temps pour s'adapter à de nouveaux groupes cibles de consommateurs. Aux basses altitudes (au-dessous de 1500 m), le tourisme d'hiver pourrait bientôt toucher à sa fin [OcCC/ProClim]. Les coûts d'adaptation incluent aussi la protection contre les coulées de boue et la réalisation de nouveaux ancrages d'installations en zones de pergélisol (paravalanches, mâts et ouvrages d'art). L'évolution des risques a pour conséquence des hausses de primes d'assurance et de franchises en cas d'événements naturels.

**À PENSER No 1** : Les coûts des dommages et d'adaptation, dus aux changements climatiques, augmenteront substantiellement au fur et à mesure que ces changements gagneront en ampleur et en vitesse. À partir de 2050, ils devraient dépasser d'un multiple les coûts d'évitement du CO<sub>2</sub>, qui peuvent être limités à quelques pour cent du produit intérieur brut (PIB) mondial si l'on agit de suite. Il est nécessaire pour cela de réduire les émissions mondiales de CO<sub>2</sub>, qui sont aujourd'hui de 27 mia. de tonnes, à 10 mia. de tonnes, soit environ de 70%, d'ici la fin de ce siècle. Cet objectif ne peut être atteint que si les pays industrialisés procèdent à brève échéance à des réductions sensibles de leurs émissions de CO<sub>2</sub> et que si les technologies y relatives sont mises à disposition et utilisées dans le monde entier.

## Risques géopolitiques dus aux besoins et à l'approvisionnement énergétiques

À part le défi des changements climatiques, des risques géopolitiques se présentent du fait de l'énorme déséquilibre en matière de consommation d'énergie par personne entre les différents pays du monde et du fait de la répartition des ressources fossiles.

## Risques géopolitiques dus aux différences en matière de consommation d'énergie par personne

La consommation d'énergie par personne est très élevée aujourd'hui en Suisse, en Europe et dans d'autres économies développées, mais aussi dans les grandes villes des pays émergents. Actuellement, les pays européens ont besoin de 170 GJ (cf. glossaire) d'énergie primaire par personne et année, principalement sous la forme de pétrole, gaz naturel, charbon, force hydraulique et énergie nucléaire (trafic aérien international exclu) ; ceci correspond à une consommation de mazout ou d'essence de 4700 litres par personne et année. 80% de la consommation d'énergie sont fournis par des agents énergétiques fossiles (en Suisse 58% de 160 GJ/personne/année).

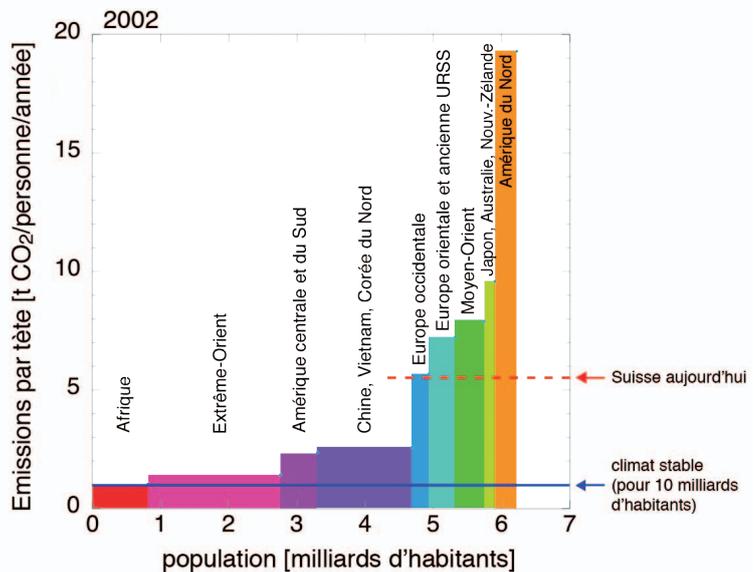
D'un autre côté, bien plus de la moitié de l'humanité doit se satisfaire de très peu d'énergie (fig. 1-5). Environ 1.6 mia. d'êtres humains n'ont même pas accès à l'électricité. Vu que la population des régions les moins développées (avant tout en Afrique), dont la consommation d'énergie par personne est très faible, présente la croissance la plus vertigineuse, il est urgent de ralentir cette évolution démographique par une amélioration rapide des conditions de vie. Une telle amélioration est couplée à la disponibilité d'un minimum de services énergétiques. Aussi les pays émergents et en développement prétendent-ils à une part croissante de la consommation mondiale d'énergie.

Fig. 1-5 : Emissions de CO<sub>2</sub> par personne, issues de sources d'énergie fossile, selon les régions du monde.

Chacune des surfaces correspond à l'émission de CO<sub>2</sub> d'une région. A titre de comparaison : la Suisse émet 6 t CO<sub>2</sub> par personne et année, la Chine (1.3 mia. d'habitants) 3.1 t et l'Inde (1.05 mia. d'habitants) 1.2 t.

Pour stabiliser la température, les émissions de CO<sub>2</sub> d'une population mondiale de 10 mia. d'habitants doivent être réduites à long terme à environ 1 tonne CO<sub>2</sub> par personne et année (ce qui correspond à 500 Watt d'énergie thermique provenant de sources fossiles)

[ProClim, sur la base de ORNL UN].



Mais cette évolution ne doit en aucun cas se faire de la même manière que dans les pays industrialisés, parce que toutes les régions du monde, à l'exception de l'Afrique, ont déjà dépassé aujourd'hui l'objectif d'émission de 1 tonne CO<sub>2</sub> par personne (fig. 1-5). Premièrement, cela aggraverait encore davantage la problématique du climat. Deuxièmement, de nombreux pays émergents et en développement sont particulièrement touchés par les conséquences des changements climatiques (p.ex. manque d'eau). Combiné au bas niveau de la qualité de vie, cela pourrait conduire à d'importantes migrations, à des conflits de répartition entre responsables et victimes des changements climatiques et à des pertes de croissance pour l'économie mondiale. Le conseil scientifique du gouvernement fédéral allemand (WBGU) craint que des changements climatiques non contrôlés ne puissent conduire à l'un des conflits politiques centraux du 21<sup>e</sup> siècle [WBGU].

### Risques géopolitiques dus à l'approvisionnement énergétique

Du côté approvisionnement, un risque existe du fait de la répartition inégale des ressources

fossiles d'une région à l'autre. Ce déséquilibre est particulièrement prononcé pour le pétrole, qui continue de dominer sur les marchés énergétiques mondiaux avec une part d'un bon tiers du marché mondial des agents énergétiques primaires. À peu de chose près, 60% des réserves mondiales prouvées de pétrole se trouvent au Moyen-Orient, dont plus d'un tiers en Arabie Saoudite. Les pays de l'OPEC totalisent 70% des réserves de pétrole. Les centres de consommation traditionnels que sont les USA, l'Europe et le Japon disposent en revanche de réserves propres aussi insuffisantes que la Chine, l'Inde et le Brésil, pays dont la consommation est de plus en forte croissance.

Cette dépendance des économies nationales les plus importantes à l'égard d'un petit nombre de régions en majorité politiquement instables recèle des risques notables. Des conflits dans ces régions pourraient entraver substantiellement la sécurité de l'approvisionnement mondial, avant tout si, de façon similaire à ce qui s'est produit en 1956 lors de la crise de Suez, des pipelines importants étaient détruits par le sabotage ou la guerre ou des voies de transports rendues impraticables (canal de Suez, détroit d'Hormuz, détroit de Malacca). En

réaction au danger de tels conflits, la préservation de l'accès aux ressources deviendra toujours plus un des moteurs de la politique étrangère de ceux qui s'en sont rendu particulièrement dépendants par leur style de vie.

Des conflits violents, tels que les guerres en Irak ou au Soudan, de même que l'étatisation de gisements énergétiques en Russie ou au Venezuela, peuvent être compris comme des signes annonciateurs d'une lutte intensifiée pour les sources d'énergie, quand bien même le respect de normes environnementales (Russie) ou la lutte contre le terrorisme (Irak) sont avancés comme raisons.

**À PENSER No 2 :** La disponibilité à un coût avantageux et, dans une large mesure, illimitée du pétrole au 20<sup>e</sup> siècle a entraîné la société industrielle dans une dépendance dangereuse. Les conséquences en deviendront plus perceptibles avec la soif d'énergie grandissante des pays émergents, qui dépassent aujourd'hui déjà l'objectif mondial d'émission de 1 tonne de CO<sub>2</sub> par personne et année, et avec l'approche du pic de production du pétrole réparti de façon inégale selon les régions. Il s'ensuit le risque de hausse des prix de l'énergie et de conflits violents. Ce sont là encore d'autres raisons qui motivent l'urgence d'une utilisation plus efficace des énergies fossiles et de la substitution de ces dernières par des énergies renouvelables.

Une situation semblable à celle du pétrole se présente pour le gaz naturel, qui est également concentré dans un petit nombre de régions et a une part de 20% au marché mondial des agents énergétiques primaires. 42% des réserves de gaz naturel se trouvent au Moyen-Orient, 32% dans les anciennes républiques de l'Union soviétique.

Les risques géopolitiques sont par contre moins prononcés en ce qui concerne le charbon. Ici, les réserves sont plus uniformément réparties et les pays grands consommateurs disposent également de réserves substantielles. Le recours au charbon pourrait donc atténuer le risque géopolitique, mais il aggraverait en revanche le problème climatique, vu que les émissions de CO<sub>2</sub> par unité d'énergie sont environ deux fois plus élevées pour le charbon que pour le gaz naturel.

Les réserves de l'uranium nécessaire aux centrales nucléaires se concentrent principalement en Australie, au Canada et aux USA. Aussi les risques géopolitiques sont-ils relativement faibles dans ce cas, et les barres de combustible sont aisées à stocker. Toutefois, utilisé dans les réacteurs actuels et consommé en même quantité qu'aujourd'hui, l'uranium est limité dans une mesure semblable au gaz naturel. Les centrales nucléaires de la prochaine génération (la quatrième), qui sont actuellement en développement, pourraient améliorer l'utilisation de l'uranium de deux ordres de grandeur.

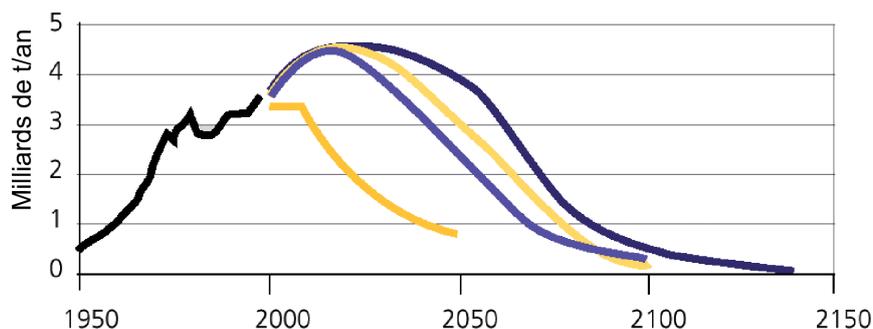


Fig. 1-6 : Production de pétrole conventionnel (en noir) et estimations d'experts au sujet de l'évolution possible (lignes en couleurs).

## Le risque du prix de l'énergie une fois atteint le pic de production du pétrole

Un autre défi relatif à l'approvisionnement se présentera lorsque le pic de la production mondiale de pétrole conventionnel sera atteint. Ce cap a été franchi en 1999 dans la mer du Nord et en 1970 aux USA. Le pic de production du pétrole dans le monde est majoritairement attendu entre 2015 et 2035 (cf. fig. 1-6). À partir de ce moment, l'offre en pétrole conventionnel diminuera [BP]. Cependant, ce moment dépend fortement de l'évolution technologique en matière de prospection et d'extraction, lesquelles sont assujetties aux investissements de l'industrie pétrolière, qui à leur tour sont fonction du prix du pétrole sur le marché.

Le pétrole est indispensable avant tout à la production de matières synthétiques, aux transports aériens et, dans une moindre mesure, aux transports routiers. L'extraction de pétrole non conventionnel (par exemple des sables pétrolifères au Canada) n'est possible qu'à des coûts plus élevés et provoque des nuisances environnementales supplémentaires. Le pétrole non conventionnel ne pourra probablement compenser le recul du pétrole conventionnel que durant quelques années après le pic de production. Néanmoins, des ressources fossiles seront à disposition encore pendant des décennies, car il y a encore d'énormes quantités de charbon ainsi que

d'autres combustibles fossiles peu utilisés jusqu'ici (p.ex. les clathrates de méthane).

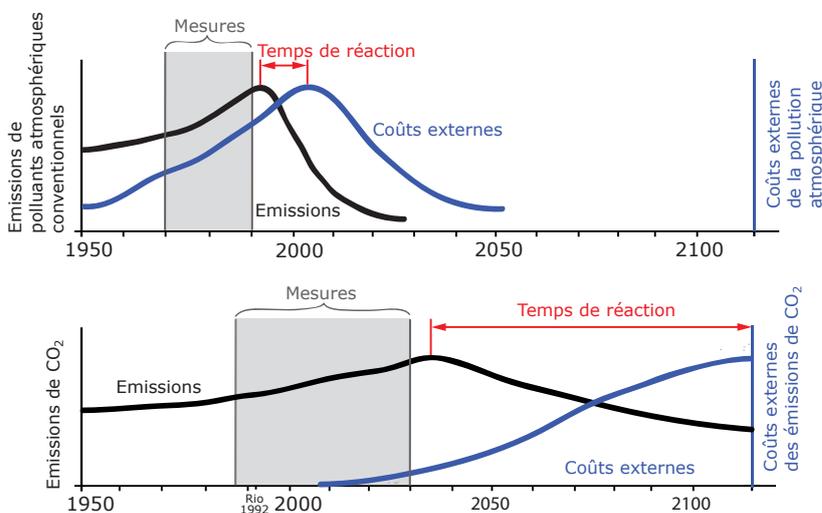
Si la demande mondiale en pétrole présente encore une tendance à la hausse une fois le pic de production atteint, le prix de l'or noir montera en flèche. En conséquence du manque de solutions alternatives, on observe pour le pétrole une faible élasticité de la demande : c'est ainsi que depuis 1999, le prix du baril de brut a fluctué entre 10 \$ et 90 \$, dans l'ensemble sans influence perceptible sur la demande. Une hausse subite très prononcée du prix du pétrole peut peser lourdement sur l'économie nationale.

D'autre part, il ne fait pas de doute qu'une hausse du prix du pétrole offre aussi des chances en matière de compétitivité des énergies renouvelables et quant à l'attrait économique des mesures d'efficacité énergétique. Ceci est valable aussi pour les pays en développement qui seront particulièrement touchés par la montée attendue du prix de l'énergie sur les marchés mondiaux.

## Défis aux systèmes politiques et sociaux

Des grands changements de l'environnement naturel constituent aussi un défi pour les systèmes politiques et sociaux. En général, un système démocratique ne subit un changement que lorsque

Fig. 1-7 : Le dilemme de la politique climatique (moitié inférieure de l'image) comparé à la politique environnementale pour les polluants atmosphériques classiques (moitié supérieure). Dans le cas des polluants atmosphériques conventionnels, la mise en œuvre de mesures politiques a lieu sous la pression des dommages survenus, et les coûts des dommages diminuent rapidement après le début des réductions d'émissions. Dans le cas des émissions de CO<sub>2</sub>, des mesures doivent être décidées et prises au niveau politique longtemps (quelques décennies) avant que les coûts externes des dommages n'augmentent substantiellement.



les électeurs font personnellement l'expérience des dommages provoqués par un changement environnemental. La prise de conscience publique crée une pression efficace sur les milieux politiques qui fixent alors de nouvelles conditions cadres pour les activités à l'origine des dommages.

Dans le cas des polluants atmosphériques classiques, tels que la poussière, les NO<sub>x</sub> ou le SO<sub>2</sub>, les dommages causés (p.ex. maladies respiratoires, dégâts aux récoltes) sont perçus déjà après peu d'années par tout un chacun (cf. moitié supérieure de la fig. 1-7). De plus, les polluants atmosphériques classiques sont éliminés de l'atmosphère en l'espace de quelques jours à quelques semaines. La situation est différente en ce qui concerne les changements climatiques : du fait de la persistance des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et des

temps de réaction très longs du système climatique global, les dommages causés ne deviennent perceptibles qu'après des décennies ou même des siècles. Du fait du retard de la prise de conscience du public, la pression sociale fait défaut, d'où le danger que les mesures politiques pour enrayer l'évolution n'interviennent trop tard. Beaucoup de temps passe jusqu'à ce que l'on comprenne la nécessité de nouvelles conditions cadres et jusqu'à ce que ces dernières permettent de diminuer ou éviter les dommages grâce à des changements des choix et comportements de la société. Du temps est encore nécessaire pour négocier les conditions cadres elles-mêmes dans le contexte social. Reste à savoir quel mix de développement technique, augmentation des prix de l'énergie et évolution des valeurs est à même d'aboutir à un style de vie respectueux du climat dans les pays industrialisés et comment fixer les conditions cadres pour ce mix. C'est ainsi qu'une évolution des valeurs est considérée comme n'étant pas de première urgence par ceux qui misent sur le développement technique et sur des réactions correctes et opportunes des marchés mondiaux. D'autres sont d'avis qu'il faut influencer le comportement en matière de consommation d'énergie par des prescriptions ou des incitations.

Dans son rôle d'instrument social de détection précoce, la science est ainsi mise au défi de motiver, par un dialogue intense, les milieux politiques, l'économie et la société à prendre suffisamment tôt les mesures nécessaires (cf. moitié inférieure de la figure 1-7). Ce faisant, elle doit faire valoir son attitude anticipatoire non seulement dans les pays industrialisés, mais aussi dans les pays émergents.

**À PENSER No 3** : Les conséquences des émissions de gaz à effet de serre ne se font sentir qu'après des décennies ou des siècles, du fait que ces gaz séjournent très longtemps dans l'atmosphère. Les indices des changements climatiques ont été reconnus dans de larges cercles de la société, des milieux politiques et de l'économie, ce qui a conduit à de premières décisions de politique climatique et énergétique. La réduction nécessaire des émissions de CO<sub>2</sub> en Suisse au moins de 2% par année exige néanmoins des conditions cadres nettement plus efficaces en politique énergétique et climatique. Le domaine de l'énergie et du climat sera révélateur du degré d'efficacité avec lequel le système social édifié sur le libre marché est capable de corriger, par des changements de conditions cadres et des attitudes fondamentales, les évolutions négatives dont il est lui-même la cause en matière de consommation de ressources.



## Possibilités de solutions technologiques et entrepreneuriales

De grands efforts, des innovations et toute une palette de mesures sont nécessaires pour faire face avec succès aux défis posés au système énergétique de la Suisse. Il faudra par exemple accroître l'efficacité énergétique, promouvoir les énergies renouvelables et les agents énergétiques non carbonés, prendre en compte les coûts externes, supprimer des barrières économiques et institutionnelles, et abolir des lois et subventions qui favorisent les émissions de gaz à effet de serre. De nombreuses possibilités sont connues et n'ont plus qu'à être réalisées en faisant preuve de résolution et de rapidité. D'autres solutions viendront s'ajouter pendant les décennies à venir. L'amélioration de l'efficacité énergétique et un recours accru aux énergies renouvelables exigent une intensification des capitaux, c'est-à-dire des investissements de départ plus élevés, mais conduisant à des coûts nettement inférieurs en cours d'exploitation. L'utilisation plus efficace de l'électricité et la production de cette dernière resteront une question cruciale pour ces prochains dix à vingt ans, car les centrales nucléaires vieillissantes devront en partie être mises hors service.

### La révolution de l'efficacité en matière d'utilisation des matériaux et de l'énergie, programme technologique de ce siècle

L'utilisation de l'énergie se déroule sur trois niveaux (cf. fig. 2-1). L'énergie disponible sous forme de pétrole, uranium, force hydraulique ou autres agents énergétiques est dite *énergie primaire*. Après déduction des pertes de transformation et de transport, le consommateur dispose de ce qu'on appelle l'*énergie finale* sous forme de mazout, essence, électricité, chaleur à distance etc. L'énergie qui satisfait les besoins de l'utilisateur final est dénommée *énergie utile* (p.ex. chaleur, énergie motrice, lumière, moyens électroniques de communication). Ce qui sert effectivement les besoins du consommateur sont les *services énergétiques*, par exemple un local agréablement tempéré, un repas chaud ou le transport vers une destination de vacances.

Il y a des pertes d'énergie à chacun des trois niveaux. Pour la *transformation de l'énergie primaire en énergie finale*, ces pertes se montent actuellement à 20%. Cette valeur s'est améliorée au cours des cinq dernières années. Dans les centrales thermiques, les pertes (de chaleur) se situent aujourd'hui entre 60 et 65% (dans les nouvelles centrales à gaz, elles ne sont plus que de 40%). La perte moyenne lors de la conversion de l'*énergie finale en énergie utile* est à peu de chose près de 48% en Suisse. Les pertes sont particulièrement élevées pour les systèmes de traction des véhicules routiers (env. 80%), l'éclairage classique au moyen de lampes à incandescence (91%) et les processus industriels à haute température (44%). Du fait de ces pertes importantes, l'utilisateur final ne dispose sous forme d'énergie utile que de 41% de l'énergie primaire investie au départ [Jochem et al]. Enfin, des pertes se produisent lors de la *transformation de l'énergie utile en un service énergétique sou-*

*haité* : dissipation dans l'environnement de chaleur non utilisée (p.ex. pertes thermiques d'un bâtiment mal isolé, chaleur inutilisée des eaux usées), pertes de résistance au roulement et à l'air d'un véhicule surdimensionné pour les achats quotidiens.

Une utilisation plus efficace de l'énergie, c'est-à-dire une réduction de ces pertes, permettrait de réduire le besoin énergétique par personne d'un facteur 5 environ au cours des six à sept prochaines décennies. Des économies ne relevant pas de l'efficacité peuvent être obtenues en modifiant les exigences relatives aux *services énergétiques* (p.ex. réduction des kilomètres parcourus en véhicule, voitures plus petites, réduction de la surface chauffée ou climatisée par habitant, fruits de saison de la région).

### Étapes d'une diminution du besoin d'énergie primaire par unité du PIB

Les quatre étapes décrites ci-dessous permettraient de diminuer de 80% le rapport entre besoin d'énergie primaire et produit intérieur brut en l'espace de quatre-vingts ans [Jochem et al].

### Étape 1. Amélioration de l'efficacité énergétique des convertisseurs d'énergie

Pratiquement tous les convertisseurs d'énergie (p.ex. brûleurs, chaudières, turbines à vapeur et à gaz, moteurs électriques et à combustion, échangeurs de chaleur, compresseurs) présentent encore des possibilités d'amélioration petites ou grandes, comme par exemple le recours à des matériaux résistant à la chaleur, un meilleur réglage, des améliorations de la construction, l'utilisation d'oxygène pur au lieu de l'air. À ceci s'ajoute l'amélioration du rendement de la fourniture de chaleur industrielle par substitution des brûleurs par le couplage chaleur-force avec turbines à gaz ou piles à combustible.

L'abondance des convertisseurs d'énergie mentionnés ici montre que les possibilités ne s'arrêtent pas à l'amélioration très discutée de l'efficacité des centrales thermiques. Le potentiel d'amélioration de ces dernières, de 10 à 20 %, est certes considérable, mais ses perspectives se limitent à la production d'électricité thermique, alors que des pertes d'énergie tout aussi élevées sont largement ignorées à propos d'autres convertisseurs. C'est ainsi que les

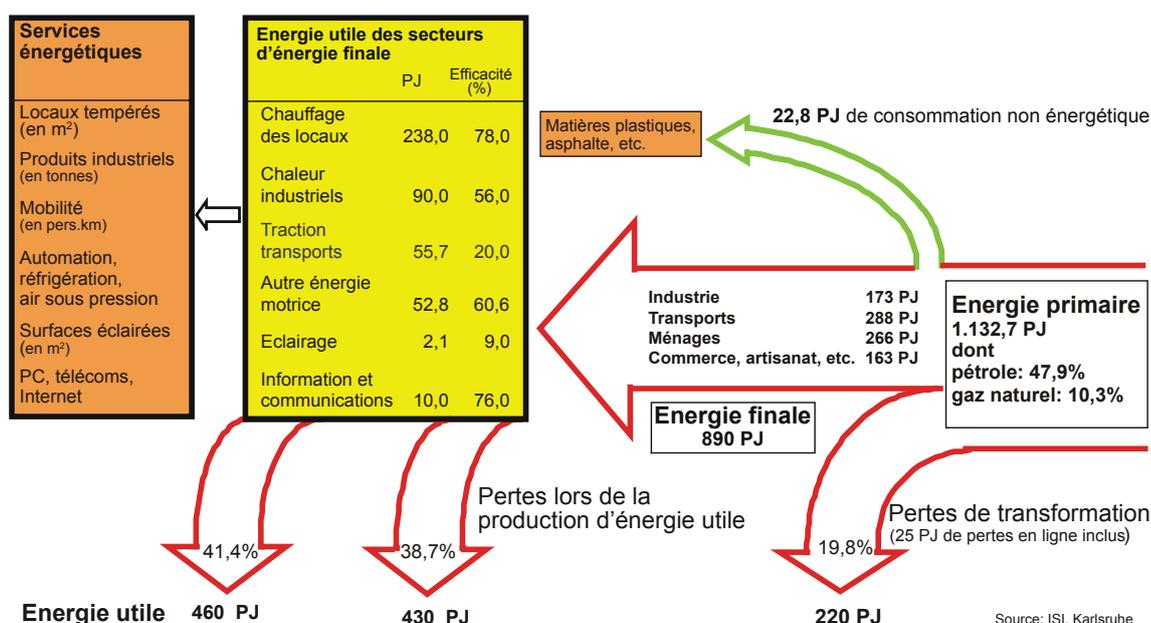


Fig. 2-1 : Diagramme des flux d'énergie en Suisse en 2005 : les services énergétiques souhaités par les êtres humains sont fournis en plusieurs étapes comprenant des pertes. En 2005, 58% de l'énergie primaire provenait de sources fossiles. (1 térawattheure [TWh] = 3.6 pétajoules [PJ]).



véhicules routiers – qui dépendent aujourd’hui dans le monde entier à presque 100% du pétrole – ont d’énormes pertes de conversion (environ 80% au niveau du moteur à combustion et de la transmission). De nouveaux systèmes de traction sont nécessaires, p.ex. la traction hybride.

Les agents énergétiques fossiles ou l’électricité sont beaucoup trop précieux, énergétiquement parlant, pour être utilisés dans des applications à basse température. L’exploitation de la chaleur perdue ou de la chaleur environnementale (au moyen de pompes à chaleur et de l’énergie solaire) est bien plus efficace pour le chauffage et la production d’eau chaude.

### **Étape 2. Diminution du besoin en énergie utile par une amélioration de l’efficacité et la substitution de techniques actuelles**

Il existe de nombreuses possibilités de diminuer le besoin en énergie utile par des substitutions et des améliorations. Il faut aspirer aujourd’hui déjà à maximiser les économies pour les objets dont le cycle d’investissement est de plusieurs décennies. Les possibilités suivantes sont mentionnées à titre d’exemple. Les nouvelles constructions et, moyennant quelques concessions, les rénovations de bâtiments peuvent être réalisées selon le standard énergétique d’une maison passive ou Minergie-P. Dans le secteur industriel, le besoin d’énergie peut être sensiblement réduit en substituant au laminage la fonte des métaux, qui permet d’obtenir les pièces dans leur forme presque définitive. De même, la substitution de l’évaporation et du séchage par des procédés physico-chimiques de séparation, plus économes en énergie, serait judicieuse (p.ex. la technique des membranes dans l’industrie alimentaire et pharmaceutique). Une meilleure isolation permettrait de réduire les pertes thermiques des fours industriels et des transports de chaleur. Le recours à l’électronique de puissance pour récupérer l’énergie de freinage des ascenseurs et escaliers roulants accroît leur efficacité énergétique.

Dans le secteur des transports, les pertes peuvent être sensiblement réduites en faisant usage de

véhicules plus légers offrant une résistance à l’air minimale (l’aire de la coupe transversale exposée réduite au minimum) et en récupérant l’énergie de freinage (autos et trains). L’amélioration des télécommunications, par exemple les vidéoconférences et la transmission de données, rend plus d’un voyage superflu. Une stratégie plus souple et optimale en matière de déplacements (incluant aussi les transports en commun) et une amélioration de la logistique (diminution des transports à vide) permettent d’optimiser les transports.

### **Étape 3. Recours accru au recyclage et utilisation plus efficace de matériaux nécessitant beaucoup d’énergie**

Des matériaux dont la production initiale est très coûteuse en énergie sont obtenus avec nettement moins d’énergie à partir des mêmes matériaux récupérés (besoin énergétique des voies de recyclage inclus). La part de recyclage des matériaux utilisés depuis de nombreuses décennies est aujourd’hui déjà relativement élevée (p.ex. supérieure à 50% en Europe pour le papier et le verre d’emballage) ; les taux de recyclage sont par contre relativement bas pour les matériaux plus jeunes (p.ex. env. 20% pour les matières plastiques). Le besoin total d’énergie industrielle pourrait être réduit de 10% supplémentaires si celle-ci épuisait le potentiel de recyclage. Les ressources en matériaux ne se trouvent donc pas seulement dans la croûte terrestre, mais peuvent être tirées, souvent de façon plus économe en énergie, de l’infrastructure et des biens de consommation des pays industrialisés.

Le besoin en matériaux, spécifique à différentes prestations, peut être diminué de surcroît par des modifications ciblées des propriétés de ces derniers (meilleures propriétés mécaniques) et par des changements touchant à la réalisation des produits eux-mêmes. Le recours à des matériaux d’emballage plus minces, la réduction du poids du mètre carré d’imprimés, les mousses d’aluminium, de magnésium et de matières synthétiques, ou encore la

diminution de l'épaisseur de revêtements de laque, catalyseurs et autres surfaces spéciales grâce à la nanotechnologie, sont quelques-unes des nombreuses possibilités qui se présentent à cet égard.

#### **Étape 4. Recours à des matériaux exigeant un moindre investissement énergétique**

Le potentiel de substitution des matériaux repose sur leur besoin énergétique spécifique différent. Les matériaux et matières premières naturels notamment recèlent des potentiels d'économie d'énergie importants pour des substitutions bien ciblées. Les décisions relatives au choix et à la substitution de matériaux se prennent toutefois en considérant en premier lieu des aspects financiers, les propriétés des matériaux et de leur utilisation ainsi que l'image du matériau considéré et les tendances à la mode. On observe aujourd'hui une tendance grandissante à utiliser de nouveau des matériaux et produits biogènes (p.ex. le bois, le lin, le chanvre, l'amidon, les graisses et huiles naturelles), qui nécessitent bien moins d'énergie que les matériaux d'origine pétrochimique.

Le potentiel d'économie d'énergie de l'ensemble des possibilités techniques décrites dans les quatre étapes se situe entre 80 et 90% du besoin actuel d'énergie primaire. Ce potentiel pourrait être réalisé d'ici la seconde moitié du siècle présent [Jochem et al].

#### **Utilisation plus intensive des biens et concepts urbains ménageant les ressources**

À part ces aspects techniques ayant trait à l'efficacité en matière d'énergie et de matériaux et à l'économie en boucle fermée, il faut aussi que les entreprises innovent pour promouvoir une utilisation efficace des ressources naturelles :

#### **Utilisation plus intensive des biens**

Par une utilisation plus intensive des biens de consommation, véhicules, machines et installations de production, on améliore, dans une perspective

économique globale, l'efficacité des matériaux et diminue ainsi indirectement la demande énergétique de l'industrie. « Utiliser en commun au lieu de posséder », c'est faire passer l'aspect de l'utilisation d'un bien de consommation ou d'investissement avant celui de la propriété. Le concept de pooling et de production répartie (contrat de sous-traitance) a pour principe de rendre des biens de consommation issus d'un pool ou des machines et installations accessibles à plusieurs utilisateurs qui ne les emploient pas en même temps. Aujourd'hui, des exemples connus de pooling sont la location (à échéance courte) de machines de chantier, appareils de nettoyage et véhicules (entre autres le covoiturage), les salons de lessive ou les contrats de sous-traitance pour les récoltes dans le secteur agricole et pour des processus très coûteux en énergie dans le secteur industriel. L'avantage de ces services du point de vue énergétique tient à ce qu'ils diminuent les quantités de biens nécessaires pour satisfaire les besoins sociaux ou évitent des pertes au démarrage et à l'arrêt d'installations coûteuses en énergie dans la production industrielle. Dans nombre de cas, les biens de consommation devraient avoir une plus longue durée d'utilisation (rupture avec la société de gaspillage). Ceci exige des standards minimums de qualité.

#### **Concepts urbains ménageant les ressources**

À part les opportunités au niveau des entreprises, il est possible aussi de promouvoir la planification urbaine dans une perspective d'économie des ressources. L'intégration des différentes fonctions d'un site urbain, à savoir l'habitat, le travail, le commerce et les loisirs, permet d'éviter une part appréciable de transports. Les villes recèlent un potentiel d'économie d'énergie qui peut être valorisé en mélangeant mieux les différentes fonctions qu'elles remplissent – habitat, travail, achats et loisirs –, en favorisant un urbanisme dense, en proposant des offres attractives en logements pour personnes âgées, ce qui permettrait de libérer et mieux remplir ensuite de grands appartements, et en concentrant les activités industrielles et artisanales dans des bâtiments à plusieurs étages.



## Les énergies renouvelables : un potentiel considérable

---

Les énergies renouvelables constituent, à côté de l'utilisation efficace de l'énergie et des biens, l'une des réponses centrales aux défis de l'approvisionnement énergétique futur. Le potentiel technique des sources d'énergie renouvelable suffit de loin à couvrir le besoin mondial d'énergie primaire [PNUD, chapitre 7]. Leur exploitation dans les conditions actuelles du marché et des prix est en partie déjà rentable, mais en partie aussi jusqu'à dix fois plus cher que le recours aux agents énergétiques conventionnels. Il faudra beaucoup de temps et d'efforts politiques et entrepreneuriaux pour diminuer les écarts entre coûts par la prise en compte des coûts externes et par des effets d'apprentissage et d'échelle des nouvelles technologies. En outre, on sait par expérience qu'il faut souvent plus de cinquante ans jusqu'à ce qu'un agent énergétique primaire atteigne une part supérieure à un tiers du marché mondial, ceci tenant à de longs cycles de réinvestissements et à une intensité en capitaux élevée. L'UE s'est fixé pour objectif de faire passer de 6.4% aujourd'hui (2007) à 20% en 2020 la part des énergies renouvelables dans le besoin total en énergie primaire [UE]. L'exemple de l'énergie éolienne montre que de tels objectifs ne sont pas nécessairement irréalistes. Mais leur réalisation sera de plus en plus coûteuse. Car à cet égard, de grands progrès ont été réalisés ces quinze dernières années en Europe – quand bien même avec l'appui de conditions-cadres politiques telles que la rétribution garantie, mais dégressive, du courant injecté dans le réseau électrique. La part de l'énergie éolienne dans la production d'électricité a connu une croissance considérable ces dernières années et s'élevait en 2006 dans l'UE-25 à environ 2 pour cent. L'UE s'attend à ce que cette part continue d'augmenter et atteigne 12 pour cent en 2020 [UE]. Une évolution présentant une dynamique semblable se dessine maintenant dans quelques pays de l'UE pour la production d'électricité à partir de biogaz et de copeaux et pellets de bois.

Le potentiel d'utilisation des sources d'énergie renouvelables sont largement discutés depuis les deux crises du pétrole des années 70 – c'est aussi le cas en Suisse [Hirschberg et al, OFEN 2007a]. L'ASST a publié récemment un « Plan de route Énergies renouvelables Suisse » [ASST 2006]. Cette analyse décrit le potentiel techniquement exploitable des sources d'énergie renouvelables disponibles en Suisse, comment celui-ci pourrait être valorisé pendant les cinquante prochaines années et quels impacts cela aurait sur les coûts de production de l'énergie.

La Suisse dispose de sources d'énergie renouvelable dans différents domaines. Il s'agit pour l'essentiel de trois formes :

1. chaleur de l'environnement valorisée au moyen de pompes à chaleur, solaire thermique, géothermie et biomasse ;
2. électricité hydraulique, éolienne, photovoltaïque, géothermique et tirée de la biomasse ;
3. gaz et carburants liquides tirés de la biomasse.

Comment l'offre en énergie renouvelable de la Suisse pourrait-elle se développer jusqu'en 2050 si le potentiel techniquement exploitable des sources d'énergie renouvelable disponibles dans le pays était largement exploité ? L'électricité produite en Suisse à partir de ces sources d'énergie augmente-

**À PENSER No 4 :** Une société industrielle, qui n'émettrait qu'une tonne de CO<sub>2</sub> par personne et année, ce qui correspond à env. 400 l de mazout par personne et année, est réalisable pendant ce siècle. Une utilisation cinq fois plus efficace de l'énergie primaire est également techniquement faisable. Même une économie en boucle fermée est possible, qui réutiliserait après usage les ressources tirées de la nature, recourrait exclusivement aux énergies renouvelables et atteindrait un haut niveau d'efficacité. Une telle économie en circuit fermé peut aussi connaître une croissance économique, notamment lors d'une demande accrue de biens immatériels.

rait par rapport à aujourd'hui de 15 TWh jusqu'en 2050 (tab. 2-1). En incluant l'électricité des centrales hydrauliques existantes et techniquement optimisées, on obtiendrait au total une production d'électricité renouvelable de quelque 50 TWh. La production de chaleur à partir de sources d'énergie renouvelable pourrait évoluer de 63 PJ (17.5 TWh) aujourd'hui à environ 88 PJ (24.3 TWh) en 2050 (tab. 2-2). En 2070, elle pourrait même s'élever à plus de 30 TWh. La production d'agents énergétiques chimiques à partir de sources d'énergie renouvelable est particulièrement attractive, car sous cette forme, l'énergie peut être aisément stockée et utilisée de façon efficace. Il serait possible en 2050 de produire presque 6 TWh sous forme de carburants liquides, 5 TWh sous forme de gaz.

Au total, la production de chaleur utile, électricité et carburants à partir de sources d'énergie renouvelable pourrait ainsi progresser de 42.6 TWh aujourd'hui à quelque 85 TWh en 2050 (de 7.6 TWh à presque 50 TWh si l'on ne compte pas les centrales hydrauliques). Dans l'ambitieux scénario IV, prévoyant des mesures particulièrement rigoureuses, de l'Office fédéral de l'énergie, la consommation d'énergie recule, à peu de chose près, d'un tiers jusqu'en 2035. Il serait ainsi possible de couvrir presque la moitié du besoin énergétique sous forme renouvelable. Et encore ces chiffres ne prennent-ils pas en considération les possibles importations d'énergie renouvelable, p.ex. de biocarburants, d'électricité solaire ou éolienne, voire d'hydrogène produit par voie solaire. Des exemples sont la participation à des centrales solaires dans des régions du sud ou à des parcs éoliens dans la mer de Nord. Toutefois, l'importation d'énergies renouvelables n'est pas non plus toujours sans inconvénient, par exemple si des biocarburants sont produits aux dépens des denrées alimentaires ou si des forêts vierges tropicales sont sacrifiées à cet effet [BFE/EMPA].

L'avantage le plus important des sources d'énergie renouvelable par rapport aux non renouvelables est qu'elles sont disponibles de façon durable. L'exploitation des énergies renouvelables est néanmoins liée à quelques difficultés. Celles-ci tiennent d'une part à une densité d'énergie le plus souvent faible :

Tab. 2-1 : Production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable en 2003 et 2050 [ASST 2006]. (Par comparaison : consommation brute en 2005 : 573 TWh)

	2003 [TWh]	2050 [TWh]
Géothermie	-	2.1
Biomasse	0.78	3.8
Photovoltaïque	0.017	5.7
Éolienne	0.005	1.2
Hydraulique	34.3	37.3
<b>Total</b>	<b>35.1</b>	<b>50.1</b>

Tab. 2-2 : Production de chaleur à partir de sources d'énergie renouvelable en 2003 et 2050 [ASST 2006]. (Par comparaison : besoin de la Suisse en chauffage en 2005 : 300 PJ)

	2003 [PJ]	2050 [PJ]
Pompes à chaleur	5.0	41
Solaire thermique	0.7	12
Géothermie	-	8.6
Biomasse	18.7	26
<b>Total</b>	<b>24.5</b>	<b>88</b>

pour pouvoir être utilisées aussi facilement dans les infrastructures existantes que les agents fossiles, les énergies renouvelables doivent souvent être concentrées à l'aide de moyens techniques. Des difficultés d'utilisation apparaissent aussi souvent du fait d'une disponibilité variable, dépendant des conditions environnementales, et dans le cas de l'énergie solaire et éolienne d'une capacité de stockage limitée. Ces deux difficultés ont pour conséquence que l'exploitation de sources d'énergie renouvelable revient actuellement généralement plus cher du point de vue de l'économie d'exploitation que l'utilisation d'agents énergétiques fossiles.

Cependant, comme décrit dans ce qui précède, les coûts d'utilisation des énergies conventionnelles augmenteront au cours des années à venir. A l'inverse, des effets d'apprentissage et d'échelle feront baisser substantiellement les coûts de production d'énergies renouvelables pendant les prochaines années. En ce qui concerne l'électricité, on peut admettre que son prix de revient en 2050 devrait se situer en Suisse



entre 6 ct./kWh (grande centrale hydraulique) et 13 ct./kWh (photovoltaïque). Si les coûts de revient de l'électricité hydraulique, solaire, éolienne, géothermique et celle tirée de la biomasse sont combinés, pour la facturation aux clients, en un prix de revient hybride, il s'ensuivra jusqu'en 2035 un renchérissement de 2 ct./kWh au maximum, soit en gros d'un tiers. En 2050, le supplément ne devrait plus être que de 1.5 ct./kWh, ce qui correspond à environ 10% du prix actuel de l'électricité. On peut s'attendre, pour la chaleur aussi, à des coûts de revient nettement en baisse. En 2050, ceux-ci devraient se situer entre 5 ct./kWh (géothermie profonde) et 13 ct./kWh (biomasse).

### **Du rôle de l'énergie nucléaire, du gaz naturel et du charbon pour la production d'électricité en Suisse**

---

#### **Énergie nucléaire**

L'énergie nucléaire offre une alternative non renouvelable et pauvre en émissions de CO<sub>2</sub> à la production d'électricité dans des centrales thermiques fossiles. Elle contribue aujourd'hui à près de 40% de la production suisse d'électricité, mais à seulement 9% de la consommation totale d'énergie finale. A l'échelon mondial, sa part se situe vers 3%. Sa contribution est néanmoins importante pour la Suisse : si les centrales nucléaires (CN) existant en Suisse, qui produisent 25 TWh par année, étaient remplacées par des centrales gaz-vapeur ultramodernes alimentées au gaz naturel (émettant 320 g de CO<sub>2</sub> par kWh), les émissions de CO<sub>2</sub> augmenteraient de 8 mio. de tonnes, soit de 18%. Ceci correspond à la moitié des émissions des transports.

L'énergie nucléaire contribue donc en Suisse dans une mesure appréciable à l'atténuation des risques climatiques. Il convient de mettre cet atout et d'autres avantages, comme p.ex. les bas coûts d'exploitation, en balance avec les problèmes qu'entraîne le recours

au nucléaire et qui paraissent inacceptables à une partie de la population : le risque de prolifération de matériel pouvant servir au nucléaire militaire, notamment dans des régions politiquement instables ; le stockage des déchets radioactifs, dont la sûreté doit être garantie pour de nombreuses générations et qui dépasse ainsi largement l'horizon temporel des activités techniques et entrepreneuriales réalisées jusqu'ici ; la possibilité d'un accident ou d'une catastrophe majeure, événement dont la probabilité est certes très faible, mais qui représente un risque non assurable dans l'actuelle économie d'assurance.

#### **Gaz naturel**

Avec une part de 12%, le gaz naturel vient en troisième position en Suisse parmi les agents énergétiques considérés du point de vue de l'énergie finale et est utilisé presque exclusivement pour produire de la chaleur. L'utilisation du gaz naturel pour produire de l'électricité dans de grandes centrales est envisagée actuellement. Elle accroîtrait encore la dépendance problématique de la Suisse à l'égard des agents énergétiques fossiles et l'émission de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère, si une utilisation plus efficace de l'énergie et le recours aux énergies renouvelables ne font pas des progrès substantiels [OFEN a]. Il faut s'attendre par ailleurs – en analogie avec le pic de production du pétrole, mais décalé de quelques décennies – à un pic de production de gaz, avec des risques d'augmentation des coûts. La dépendance à l'égard de l'étranger est encore plus importante pour le gaz que pour le pétrole, étant donné que le gaz ne peut guère être stocké pour plus de quelques jours.

Mais les centrales à gaz et les centrales compactes à cogénération en mode chaleur présentent aussi des avantages : en raison de températures d'exploitation plus hautes, elles ont un rendement plus élevé de deux tiers ; elles peuvent être réglées en fonction de la demande ; leur taille s'adapte de façon plus souple aux besoins que celle des centrales nucléaires disponibles actuellement sur le marché, ce qui facilite la possibi-

lité d'une utilisation partielle de la chaleur perdue. Les petites centrales à gaz permettent une conversion par étape vers les énergies renouvelables par mélange du gaz avec du biogaz. Enfin, elles ont des coûts d'investissement moins élevés et des temps de planification et réinvestissement plus courts.

### Charbon et stockage du CO<sub>2</sub>

Pour l'heure, les centrales à charbon n'entrent pas en discussion en Suisse. Elles sont construites en général à proximité des mines de charbon ou sur des sites accessibles en bateau. Les émissions de CO<sub>2</sub> par kWh des centrales à charbon sont, suivant le type de charbon utilisé, de 230–280% supérieures à celles des centrales à gaz. Lors de la combustion de charbon – mais aussi de pétrole ou de gaz – dans de grandes installations techniques, le CO<sub>2</sub> produit devrait de façon générale être séparé et stocké. Mais la fiabilité du stockage souterrain du CO<sub>2</sub> n'est encore guère connue et la possibilité d'un tel stockage en Suisse n'a pas été étudiée. Un point important est aussi de savoir avec quel degré de certitude on peut prévoir les fuites de CO<sub>2</sub> d'un stockage réalisé selon cette technique et la certitude qu'elles resteront négligeables durant des centaines d'années [Haugan et al].

En théorie, les émissions de CO<sub>2</sub> des centrales thermiques peuvent être réduites d'environ 80–90%, mais seulement moyennant un surcoût substantiel de 6 à 7 ct./kWh. Dans les centrales exist-

tantes, cela requiert un traitement des fumées facile à réaliser, mais coûteux. Dans les nouvelles installations, l'agent énergétique fossile est soit brûlé à l'oxygène pur, afin de n'avoir dans la fumée autant que possible que de la vapeur d'eau et du CO<sub>2</sub>, soit converti en gaz de synthèse dont on sépare le CO<sub>2</sub> avant la combustion [GIEC 2005]. Dans quelle mesure le stockage du CO<sub>2</sub> peut redonner de l'attrait à l'utilisation du charbon pour la production d'électricité dépend à la fois de l'évolution technique et des conditions cadres économiques et politiques. Il ne faut pas compter sur le stockage de grandes quantités de CO<sub>2</sub> pendant les prochaines années. La recherche de sites de stockage appropriés répond à un besoin tant dans l'UE qu'en Suisse.

### Plaidoyer pour un débat ouvert au sujet des contradictions en matière de politique énergétique

En rapport avec l'approvisionnement en électricité, le débat sur l'énergie s'empêtre toujours dans des contradictions. C'est ce que montre aussi le débat mené en Suisse au sujet des réinvestissements dans des centrales électriques, auxquels il faut s'attendre dans dix à quinze ans une « pénurie d'électricité ». Etant donné que les centrales nucléaires (CN) arrivent peu à peu à terme de leur durée de vie technique et que les droits de prélèvement (à des livraisons) d'électricité produite dans des CN françaises s'approchent de leur échéance, il est urgent de prendre des décisions sur l'approvisionnement futur en électricité. Une substitution de la production d'électricité des CN uniquement par des énergies renouvelables indigènes n'est guère réalisable [ASST 2006, OFEN a]. Si la Suisse entend fournir sa contribution à la réduction du CO<sub>2</sub> et substituer en même temps l'énergie nucléaire par de l'électricité d'origine fossile, il lui faudra réduire ses émissions de CO<sub>2</sub> de 20% supplémentaires ailleurs. Une alternative serait qu'elle importe une partie de son électricité des pays voisins – ce à quoi il faut s'attendre dans un marché dérégulé. Comme le courant importé serait au moins en partie d'origine fossile, cela imputerait sur d'autres la responsabilité des émissions de CO<sub>2</sub> y relatives.

**À PENSER No 5 :** La Suisse a besoin de prescriptions contraignantes en matière de politique énergétique afin d'obtenir une amélioration très significative de l'efficacité énergétique et d'exploiter pleinement les énergies renouvelables. Mais même ainsi, il ne sera pas facile de faire face à la pénurie d'électricité qui s'annonce pour ces prochaines décennies. Il incombe à l'économie énergétique et aux responsables politiques de décider avec quelle combinaison de centrales nucléaires et à gaz en mode électricité ou d'importations il faut combler la lacune résiduelle. Une hausse des émissions de CO<sub>2</sub> – possibilité de compensation du CO<sub>2</sub> incluse – est à éviter.



## Conditions-cadres d'une politique énergétique durable

Quand bien même les possibilités de réduire et éviter la consommation d'énergie sont très grandes et dans nombre de cas rentables avec les conditions-cadres actuelles, elles ne sont pas réalisées, ou seulement en partie, ceci en raison de défaillances du marché et d'autres obstacles. Nombre d'investissements et de décisions en matière de consommation ne sont pas considérés seulement sous l'angle économique, mais aussi sous l'aspect des modes de comportement courants du groupe social, de l'économie ou de l'administration (fédérale, cantonale, communale). En outre, comme les gaz à effet de serre se propagent sur toute la planète, la politique en matière de climat est, plus qu'en tout autre domaine, tributaire d'une harmonisation internationale. Vu la diversité des obstacles et des déficiences du marché, il s'agit de réunir un ensemble de conditions-cadres et de mesures qui soit accepté par la société. Une bonne dose d'initiative et de créativité est requise non seulement de l'Administration et des milieux politiques, mais aussi de l'économie et de la société civile.

### De la possibilité de faire adopter une politique énergétique conforme au développement durable

La plupart des décisions économiques et politiques reposent aujourd'hui sur des stratégies de succès à court terme. Nombre d'entreprises accordent aux décisions touchant à l'énergie une priorité relativement mineure par rapport à leur principal domaine d'activité. Quant aux ménages privés, ils décident de leurs achats souvent sur la base de l'investissement de départ, sans considérer les coûts cumulés sur le cycle de vie des appareils, voitures et logements. Des horizons temporels aussi courts sont en contradiction avec les défis mondiaux d'une utilisation durable de l'énergie, qui exige la pensée à long terme et des stratégies et décisions d'investissement en conséquence.

La rapide mise en œuvre des solutions mentionnées au chapitre précédent en matière d'utilisation

efficace de l'énergie et des matériaux et d'énergies renouvelables se heurte à toute une série de difficultés et à des modes de comportement inadéquats eu égard aux décisions à prendre :

- Une société axée sur la consommation immédiate et individuelle a de la peine à effectuer des investissements visant le long terme (p.ex. l'assainissement énergétique de bâtiments).
- Pour des raisons tenant à des préférences individuelles, à d'autres priorités ou aux habitudes, les décisions touchant à l'énergie favorisent souvent des produits et solutions énergétiques inefficaces.
- Nombre de ménages et de petites entreprises ne disposent pas des informations et connaissances nécessaires pour prendre des décisions rentables en matière d'investissements et d'achats (p.ex. le nombre d'années jusqu'à ce que le supplément d'investissement con-

senti lors d'une construction ou rénovation d'immeuble soit amorti par les économies réalisées).

- Les rapports de gestion trimestriels poussent à un recouvrement à court terme du capital et incitent les entreprises à négliger l'efficacité de leur infrastructure. Les investissements dans l'efficacité énergétique ne sont mesurés que dans un quart des cas à leur rentabilité et beaucoup trop souvent seulement selon le délai de recouvrement du capital.
- Les fluctuations des prix du pétrole et du gaz incitent à l'attentisme plutôt qu'aux investissements dans l'efficacité énergétique ou les énergies renouvelables.
- Les politiciens s'orientent souvent sur les valeurs qui ont momentanément la faveur de leurs électeurs et sur les préoccupations des représentants des intérêts contemporains. Dans leurs décisions, ils ne tiennent pas assez compte des intérêts des générations futures.

Dans les prises de décision des ménages, entreprises et administrations, l'attitude fondamentale qui domine dans la société avec ses règles de jeu économiques est une entrave à la prise en compte du long terme et du développement durable comme aspects prioritaires. Dans le domaine

**À PENSER No 6 :** Les préférences, intérêts et modes de comportement individuels doivent être pris en compte lors de la mise en œuvre d'une stratégie de durabilité en matière d'utilisation et d'approvisionnement énergétiques. Nombre d'investissements et de mesures d'organisation visant à une utilisation efficace de l'énergie et des matériaux sont très rentables et ne sont cependant pas réalisés par manque de connaissances ou par habitude. Des *analyses exhaustives à long terme*, incluant les coûts d'adaptation prévisibles aux changements climatiques en Suisse et la hausse des prix de l'énergie, sont nécessaires comme bases de décision. Ceci vaut notamment pour des structures ayant un long cycle de renouvellement, comme c'est le cas des bâtiments, des agglomérations et des infrastructures de transport et énergétiques.

privé, l'entourage réagit éventuellement par de l'incompréhension ; dans le milieu des affaires, les risques économiques figurent au premier plan des préoccupations. Dans les deux cas, la circonspection l'emporte et le statu quo est maintenu par commodité ou par souci d'éviter des coûts de transaction.

À ceci s'ajoutent, comme facteur aggravant, les intérêts de nombreux offreurs d'énergie traditionnels ou grands consommateurs d'énergie industriels. Le principe du libre marché est accepté, alors même que la prise en compte des coûts externes de l'utilisation d'énergie est rejetée par de nombreuses associations économiques. Des standards énergétiques ambitieux pour les biens de consommation de masse ont souvent de la peine à s'imposer, même lorsqu'il s'agit exclusivement de produits importés (p.ex. des voitures) et que l'économie nationale pourrait tirer avantage d'une plus grande efficacité économique.

### Conditions-cadres et instruments

Le développement durable en matière de consommation d'énergie peut être encouragé directement par le biais de conditions-cadres adéquates au niveau politique, susceptibles d'augmenter l'intérêt pour une utilisation efficace des ressources et pour les agents énergétiques produisant peu d'émissions [DETEC]. Moyennant une attitude proactive des organes politiques et de l'économie, la Suisse dispose du potentiel nécessaire pour promouvoir sur un plan général l'utilisation durable de l'énergie et devenir à cet égard pionnière dans des domaines spécifiques. Ceci est souvent aussi intéressant scientifiquement. La création de conditions-cadres optimales pour une politique énergétique conforme au développement durable requiert la combinaison et l'intervention bien ciblée du marché, de l'État et de l'auto-organisation comme modes de régulation de politiques sectorielles et technologiques et le recours aux instruments politiques y relatifs. Ceci est particulièrement nécessaire lorsque les préférences de



groupes spécifiques (p.ex. groupes de revenus, petites, moyennes et grandes entreprises, entreprises consommant peu ou beaucoup d'énergie) ne permettent pas à la société d'évoluer assez vite dans le sens souhaité. Une multitude de mesures possibles font pendant à la diversité des obstacles et des déficiences du marché, qui sont le plus souvent très spécifiques à des technologies ou groupes donnés (cf. tableau 3-1).

Les *instruments généralement efficaces fondés sur les prix* (comme p.ex. les certificats d'émission, les taxes d'incitation) consistent généralement à prendre en compte les coûts externes de l'utilisation de l'énergie, tandis que les *instruments sectoriels et spécifiques à une technologie* ont pour objet d'éliminer ou d'atténuer des obstacles et déficiences du marché ou de promouvoir les motivations existantes et des technologies choisies (cf. tableau 3-1). Dans ce dernier cas, l'*auto-organisation de l'économie et de la société* peut jouer un grand rôle. Elle peut reposer sur l'intérêt propre ou être conçue comme partenariat public-privé.

Des exemples caractéristiques de la manière selon laquelle des initiatives de politique énergétique peuvent être réalisées sur le *plan multi-ou international* sont la Convention cadre sur le climat, les directives de la Commission européenne, les subventions de la Banque mondiale, ou encore la formation continue dans le cadre de l'ONU (cf. tableau 3-1). Sur le *plan national*, il importe de ne pas recourir à des instruments en ordre dispersé en fonction du degré d'acceptation politique, mais de faire appel à une combinaison de mesures. Ces dernières devraient viser les obstacles et déficiences du marché propres au pays considéré et favoriser les opportunités et motivations des entreprises et acteurs économiques innovants. Une harmonisation internationale – aussi avec les pays émergents – est déterminante pour mener au succès une politique énergétique favorable au climat.

### Encouragement de l'efficacité énergétique

Traditionnellement, la politique énergétique dirige son attention et ses ressources sur l'offre énergétique, c'est-à-dire sur l'encouragement des sources d'énergie renouvelable, le développement de l'énergie nucléaire [AIE], l'utilisation du gaz naturel et, plus récemment, du charbon, associée à la séquestration et au stockage du CO<sub>2</sub>. En comparaison, l'efficacité énergétique a joué un rôle secondaire dans la politique énergétique des pays industrialisés ; des raisons en sont le coût, faible jusqu'ici, de l'énergie, la diversité et complexité technique, et peut-être aussi le fait que cet aspect est peu médiatique. Or c'est précisément l'utilisation efficace de l'énergie et des matériaux qui fournira, encore pendant plusieurs décennies, les solutions les plus rentables et contribuant le plus fortement à la réalisation de l'objectif à long terme qui consiste à limiter les émissions de CO<sub>2</sub> à 1 tonne par personne (l'encadré 3-2 donne des exemples à ce sujet). Il faut en conséquence intensifier la politique d'utilisation efficace de l'énergie et des matériaux, ceci tant au niveau fédéral et cantonal que sur le plan international et dans le cadre de coopérations multinationales.

Les producteurs de solutions énergétiques efficaces ne sont pas parvenus à constituer un lobby bien défini, actif aux hauts échelons politiques, tel qu'il existe pour les énergies renouvelables, ceci alors même (ou justement parce) que ces solutions efficaces font appel, comme les énergies renouvelables, à des centaines de technologies et services, offerts par de nombreuses branches de l'économie. Un plus fort engagement politique des producteurs de solutions efficaces et de leurs branches est donc une condition nécessaire à une utilisation de l'énergie et des matériaux optimale du point de vue de l'ensemble de l'économie et allant dans le sens du développement durable. Il faut aussi prendre mieux conscience des chances économiques de l'efficacité énergétique ; et les agents de l'innovation dans l'économie et du côté des ménages devraient faire davantage front commun.

Tableau 3-1 : Aperçu des principaux instruments de la politique énergétique et climatique, classés par groupes d'acteurs (sélection).

Groupes d'acteurs Types d'instruments	Institutions multi- et internationales	Confédération, cantons et communes	Auto-organisation de l'économie et de la société civile
<b>Instruments à efficacité générale</b>	<p>Certificats d'émission</p> <p>Accords multinationaux contraignants (p.ex. la Convention sur le climat)</p>	<p>Taxes d'incitation sur l'énergie et les émissions</p> <p>Impôts à affectation obligatoire</p> <p>Certificats d'émission</p> <p>Suppression de subventions et d'investissements qui favorisent les émissions de gaz à effet de serre</p> <p>Recherche et le développement</p>	<p>Informations par les médias sur une utilisation efficace de l'énergie en accord avec le développement durable</p> <p>Dialogue entre scientifiques et décideurs</p>
<b>Instruments sectoriels et spécifiques à des technologies données</b>	<p>Indication de la consommation d'énergie</p> <p>Standards techniques multinationaux</p> <p>Directives (p.ex. UE) et conventions multinationales (p.ex. G8, AIE pour l'approvisionnement en pétrole ou pour la recherche sur la fusion)</p> <p>Subventions par des banques multi- et internationales</p> <p>Formation continue et échange d'expérience p.ex. par l'AIE et des organismes de l'ONU</p> <p>Taxes sur les carburants des transports par avion et bateau</p>	<p>Certificats pour l'efficacité énergétique</p> <p>Indication obligatoire de la consommation d'énergie</p> <p>Standards techniques (p.ex. pour les bâtiments, les applications électriques)</p> <p>Subventions d'investissement, allègements fiscaux pour investissements et coûts de personnel et d'exploitation</p> <p>Rétribution dégressive du courant injecté</p> <p>Campagnes d'information, perfectionnement professionnel, formation</p> <p>Recherche et développement</p> <p>Marchés publics</p> <p>Élimination d'entraves législatives et réglementaires</p> <p>Encouragement à l'exportation de technologies énergétiques</p>	<p>Obligations librement consenties par les producteurs et importateurs</p> <p>Indication et étiquetage énergétique volontaire</p> <p>Offre de services (transports) sans effet sur le climat</p> <p>Pooling, car sharing</p> <p>Incitations par le biais des tarifs de l'énergie et par des subventions</p> <p>Information, perfectionnement professionnel</p> <p>Accent plus prononcé sur l'énergie dans l'enseignement scolaire et la formation professionnelle</p> <p>Recherche et développement</p> <p>Réseaux locaux d'apprentissage</p> <p>Acquisition en commun</p> <p>Distinctions et prix</p>

### Exemples de possibilités d'améliorations de l'efficacité énergétique

#### Ménages/appareils électriques :

**But :** diminuer le besoin d'électricité par personne en dépit du recours accru aux appareils et de l'augmentation de la surface d'habitation.

Instruments ou ensemble de mesures :

- Réduction des pertes en mode de veille de 80% grâce à des standards techniques (dans l'ensemble de l'OCDE).
- Adaptation périodique des labels UE des appareils électriques en fonction des progrès techniques ; labels à remplacer plus tard par des standards techniques s'orientant sur les meilleurs appareils de l'année précédente (règle du « top runner »).
- Extension de l'indication obligatoire de la consommation à d'autres appareils et applications électriques (p.ex. pompes de chauffage, ventilateurs, climatiseurs, compresseurs à air comprimé).
- Développement de nouvelles technologies, p.ex. des systèmes d'éclairage consommant peu d'énergie grâce à la technique LED ou des compteurs électroniques d'électricité permettant d'introduire, pour tous les clients du réseau, des prix du courant variant dans le temps.

#### Bâtiments (immeubles d'habitation ou de bureau et bâtiments industriels) :

**But :** diminuer le besoin énergétique de la Suisse de 80% dans les nouvelles constructions et de 60 à 80% dans le cycle d'assainissement.

Instruments ou ensemble de mesures :

- Programmes de formation continue pour les architectes, ingénieurs et artisans du bâtiment.
- Abaissement des coûts par la préfabrication industrielle d'éléments de construction appropriés.
- Introduction d'un standard énergétique pour les bâtiments, se montant par exemple à 40 kWh/m<sup>2</sup>.an au maximum pour les rénovations et à 30 kWh/m<sup>2</sup>.an au maximum pour les nouvelles constructions et adapté en permanence par les cantons. À titre de comparaison : un bâtiment neuf moyen consomme aujourd'hui environ 100 kWh/m<sup>2</sup>.an.
- Label énergie pour les bâtiments lors de la location ou l'achat d'immeubles et d'appartements.
- Incitations financières pour l'assainissement total d'immeubles d'habitation et de bureau et de bâtiments industriels ne satisfaisant pas aux nouveaux standards.
- Recherche et développement en matière d'éléments de construction et de diminution des coûts, notamment pour l'assainissement des bâtiments.

#### Circulation routière :

**But :** diminuer le besoin de carburant de 40% au cours des quinze années à venir.

Instruments ou ensemble de mesures :

- Augmentation graduelle des exigences à l'importation relatives à la consommation spécifique de carburant des voitures de tourisme.
- Augmentation de l'impôt sur les huiles minérales pour financer les coûts d'adaptation et de dommages des changements climatiques en Suisse.
- Utilisation de l'énergie de freinage à l'aide de l'électronique de puissance dans les véhicules hybrides et électriques.
- Optimisation de la logistique pour les transports de marchandises par la route, le rail et la mer.
- Taxation et assurances des véhicules à moteur en fonction de la consommation en carburant.
- Recherche et développement pour de nouveaux systèmes de traction et intégration de nouveaux agents énergétiques dans le dispositif existant de distribution du carburant.

#### Industrie :

**But :** améliorer le besoin spécifique d'énergie de 1.5% à 2% par an.

Instruments ou ensemble de mesures :

- Développement d'un échange régulier d'expérience des entreprises formant un réseau d'apprentissage (appelé dans le contexte international 'modèle énergétique suisse pour l'industrie'), extension à d'autres réseaux, formation continue et certification des animateurs et ingénieurs-conseils.
- Intensification des programmes de formation continue (aussi sur l'efficacité des matériaux) pour des branches et domaines technologiques spécifiques (p.ex. optoélectronique, bionique).
- Extension du programme suisse 'Air comprimé efficient' à d'autres technologies transversales telles que groupes frigorifiques, systèmes de climatisation, ventilateurs, systèmes de pompes, ascenseurs, éclairage.

### Encouragement des énergies renouvelables

En raison de leur coût d'exploitation plus élevé, les énergies renouvelables ne sont le plus souvent compétitives que si l'on reporte sur les agents énergétiques conventionnels les coûts des dommages à la santé et à l'environnement imputables à leurs émissions. La compensation des différences entre coûts externes des agents énergétiques s'impose du point de vue économique. Premièrement, elle permet de rendre économiquement compétitive des techniques existantes, produisant peu ou pas d'émissions. Deuxièmement, la prise en compte des coûts externes favorise les innovations en technique énergétique, car la production de ces dernières en grandes séries fait baisser leur coût, comme le montre l'exemple de l'énergie éolienne aux USA, au Danemark et en Allemagne.

Plusieurs instruments éprouvés sont à disposition pour encourager les énergies renouvelables (cf. tableau 3-1) : à part les impôts sur l'énergie, les taxes sur le CO<sub>2</sub> et le marché des certificats, des instruments financiers de compensation entrent aussi en question, tels que des incitations et la rétribu-

tion dégressive dans le temps du courant injecté. La rétribution du courant injecté fixée dans la loi s'est révélée un grand succès dans les pays voisins, de même que les subventions aux investissements dans les techniques de production de chaleur. Avec la révision de la loi sur l'énergie et de la loi sur l'approvisionnement en électricité, des conditions similaires règnent maintenant en Suisse. Afin d'éviter des paiements incitatifs superflus, il est judicieux de réduire année après année le montant de la rétribution d'un certain pourcentage en fonction du progrès technique.

En raison de la diversité des instruments possibles, il n'est pas rare que la question soit posée de savoir quel est « le » mix d'instruments qui conviendrait au monde entier. Un tel mix universel n'est pas possible pour des raisons sociologiques, car chaque pays et chaque groupe social peuvent avoir d'autres préférences et critères d'acceptation, ce qui influe sur la possibilité d'imposer des instruments adéquats. L'ensemble de mesures politiques réalisées dans un pays est le résultat d'un processus de négociation.

**À PENSER No 7** : La Suisse a actuellement les impôts sur les énergies fossiles les plus bas d'Europe occidentale [OCDE 2006]. L'incitation en matière d'efficacité énergétique ou d'énergies renouvelables est donc relativement faible pour les investisseurs et les consommateurs d'énergie. Du fait de son potentiel de rentabilité, l'efficacité énergétique devrait figurer au centre des efforts de politique énergétique – à côté de l'encouragement des énergies renouvelables. Des instruments appropriés (taxes d'incitation, impôts, standards techniques, indication de la consommation énergétique, perfectionnement professionnel et formation continue etc.) sont à disposition et devraient être utilisés davantage. Nombre de structures du secteur énergétique ont de longs cycles de renouvellement et sont coûteuses (p.ex. bâtiments, centrales électriques, voies ferrées, processus industriels). Pour que de tels investissements soient effectués en Suisse, les conditions-cadres devraient être fixées pour des durées en conséquence, nonobstant des obligations internationales éventuellement à plus court terme.



## Des chances pour l'économie et la science suisses

**Les chances qui pourraient résulter pour la Suisse d'une position influente et innovante en politique énergétique suscitent encore trop peu d'attention. Par son savoir-faire technique, entrepreneurial et administratif, la Suisse peut exercer de l'influence au niveau mondial. Si par exemple des entreprises suisses contribuent en Chine ou en Inde à faire appliquer le standard Minergie dans le secteur en plein essor des bâtiments, les économies nationales concernées auront reçu une impulsion en direction du développement durable. Plus la recherche et la technologie suisses auront de succès dans la réalisation de nouvelles solutions durables en matière de technique énergétique, plus grandes seront leurs chances de développement dans la compétition et le commerce internationaux.**

### Situation de la Suisse

Un coup d'œil sur la statistique du commerce extérieur met clairement en évidence, parmi les spécialités de l'industrie suisse, des solutions techniques faisant un usage efficace de l'énergie et des matériaux : par exemple certains produits électroniques (thyristors, TRIAC, DIACS), des composants de haute précision pour les moteurs à combustion, des turbines à gaz, des générateurs, des produits chimiques spéciaux pour des traitements de surface, des systèmes spécifiques de façade vitrée. Dans ces domaines, les fabricants suisses n'atteignent pas seulement des taux d'exportation très élevés, mais souvent aussi des parts de marché considérables au niveau mondial.

Des prestations de service fournies par des entreprises suisses en complément d'un produit sont particulièrement demandées. Ces prestations (planification, financement, montage, mise en service, maintenance, entretien, gestion du risque) se fondent sur le grand savoir-faire des entreprises suisses. Ces dernières ont de surcroît une bonne renommée à l'étranger pour la rapidité de leur réac-

tion lors de pannes de machines et d'installations, pour leur respect des délais et pour leur fiabilité. L'économie suisse occupe une position remarquable en comparaison internationale.

Mais d'autre part, les concurrents étrangers en Europe et au Japon gagnent rapidement du terrain dans des secteurs de production et de services où la Suisse a aujourd'hui encore une position de pointe (p.ex. en ingénierie du bâtiment). Ceci ne tient pas seulement à une automatisation plus poussée (effets d'échelle résultant de plus grands marchés intérieurs, tels que l'UE), mais aussi à des conditions-cadres étatiques plus sévères des marchés (p.ex. impôts énergétiques et écologiques plus élevés, certificats d'émission de l'UE, standards en matière de technique énergétique et environnementale plus stricts qu'en Suisse). En ce qui concerne de telles impulsions tendant à accroître les performances, la Suisse a perdu pendant les dix dernières années son rôle de leader dans plusieurs secteurs au profit de l'UE, de la Californie et du Japon [UE ; OCDE]. À plus long terme, de bas standards représentent un désavantage structurel pour l'économie suisse dans la compétition internationale.

## Chances et avantages

Investir davantage dans l'utilisation efficace de l'énergie et des matériaux ainsi que dans les énergies renouvelables permet de substituer des importations d'énergie par des biens d'investissement et des services produits le plus souvent dans le pays. Il en résulte pour la Suisse une diminution des risques géopolitiques et une augmentation de l'emploi. Une politique énergétique et climatique progressiste est donc dans l'intérêt même de l'économie.

Un développement des potentiels d'exportation de l'économie suisse pourrait aussi être obtenu en proposant davantage des solutions intégrant planification, financement, assurances, surveillance des travaux de construction, mise en service et exploitation d'installations. De telles offres pourraient même bénéficier d'un encouragement spécial par le biais des deux instruments de Kyoto liés à des projets (l'application conjointe [AC] et les mécanismes de développement propre [MDP]). Une telle intensification de l'orientation à l'exportation permettrait à la Suisse de fournir une contribution plus efficace à la solution des problèmes énergétiques et climatiques dans le monde.

Les universités, EPF et hautes écoles spécialisées sont de plus en plus fréquentées par des étudiantes et étudiants des pays émergents. Plus ces jeunes gens auront été familiarisés dans l'enseignement et la recherche avec les possibilités d'utilisation durable de l'énergie et des matériaux au niveau de la technique, des entreprises et de la politique scientifique, plus les retombées en seront efficaces et rapides quand ils retourneront dans leurs pays après avoir reçu une bonne formation. Là ils décideront, souvent à un plus jeune âge, d'investissements sensiblement plus importants (p.ex. dans les mégacités) que les diplômés européens. À cet égard, le système suisse de formation et de recherche peut exercer une influence considérable sur des décisions dans le monde entier.

La politique commerciale extérieure de la Suisse, mais aussi sa politique étrangère et de développement ainsi que sa politique universitaire devraient promouvoir tout particulièrement les coopérations et transferts de savoir-faire qui conduisent à une utilisation de l'énergie allant dans le sens du développement durable. La Suisse tirera parti de ses chances en montrant l'exemple en matière d'efficacité énergétique et d'énergies renouvelables et en étant un modèle de développement durable pour les pays émergents.

**À PENSER No 8 :** À moyen et long terme, l'économie suisse profitera, grâce à sa force d'innovation, d'une politique énergétique et climatique progressiste, mais aussi de l'excellente recherche climatique internationale et de la recherche technologique largement reconnue en matière d'utilisation et conversion de l'énergie. Une attitude active de la Suisse en matière d'utilisation efficace des ressources est payante aussi parce qu'elle crée l'opportunité d'un gain d'influence à l'échelon mondial. La Suisse pourrait en tirer profit non seulement sur le plan politique, mais aussi au niveau économique. Les établissements de formation scientifique peuvent soutenir la mise en œuvre internationale d'une telle politique, leurs diplômés étrangers étant les véhicules d'une diffusion mondiale de savoir-faire technique, entrepreneurial et politico-scientifique.



## Conclusions

Par la présente publication, les scientifiques suisses et les Académies suisses des sciences (académies-suisse) entendent assumer leur responsabilité à l'égard de la société, des générations futures et des régions les plus touchées de la planète, en indiquant les mesures nécessaires à une politique énergétique et climatique prévoyante et efficace.

1. Les *changements climatiques* constituent un immense défi pour l'humanité, car en raison de la grande inertie du système climatique, ils seront pratiquement irréversibles pour des générations. Ils sont la cause, dans le monde entier, de coûts de dommages et d'adaptation en hausse rapide. Leur cause principale est l'émission de CO<sub>2</sub> due à la forte consommation d'agents énergétiques fossiles. Pour limiter les changements climatiques, il faudra, pendant ce siècle, abaisser dans le monde entier les émissions de gaz à effet de serre à 1 tonne de CO<sub>2</sub> par personne et année, et ceci pas seulement dans les pays industrialisés, mais aussi dans les pays émergents. Pour la Suisse, cela signifie une réduction au moins de 2% par an. L'urgence de la réduction des émissions anthropogènes de CO<sub>2</sub> pourrait être accentuée par l'acquisition de nouvelles connaissances scientifiques, par exemple la contribution des écosystèmes terrestres au bilan global de séquestration/production de CO<sub>2</sub>. Les possibilités techniques et organisationnelles pour réaliser cette tâche sont en partie disponibles aujourd'hui. Du fait de sa situation géographique et de sa topographie, la Suisse sera davantage touchée par les changements climatiques que d'autres pays européens. Il s'ensuivra des coûts d'adaptation plus élevés pour les personnes privées,

l'économie et le secteur public, notamment dans les domaines du tourisme, des mesures de sécurité dans les cantons de montagne, de l'économie énergétique et hydraulique ainsi que de la climatisation des bâtiments.

2. En plus de ces changements causés par l'être humain, il faut s'attendre à une hausse considérable du prix des *combustibles et carburants fossiles*, avant tout lorsque la production mondiale conventionnelle de pétrole aura atteint son maximum (« pic de production »). Cette échéance devrait se situer entre 2015 et 2035, tout dépend du développement des techniques de production pétrolière, du comportement de l'industrie pétrolière en matière d'investissement et de la demande pendant les années à venir. Le besoin croissant en pétrole et en gaz naturel entraîne aujourd'hui déjà des tensions géopolitiques ; or il devrait encore s'intensifier, étant donné que nombre de pays émergents et en développement se trouvent en phase d'industrialisation et de motorisation. L'issue consistant à recourir davantage au charbon est contre-productive tant que le CO<sub>2</sub> n'est pas séparé et stocké de façon sûre.
3. Réduire la combustion d'agents fossiles entraîne des bénéfices secondaires substantiels, par exemple dans le secteur de la *santé*. Une moindre consommation d'énergie fossile pour le chauffage des bâtiments et une plus grande efficacité des véhicules n'abaissent pas seulement les émissions de CO<sub>2</sub>, mais aussi le rejet d'autres polluants atmosphériques. Il s'ensuivra une diminution des maladies cardiaques et

respiratoires. Le transfert des transports individuels vers les transports publics diminuera aussi les blessures dues aux accidents de la route, pour autant qu'il entraîne effectivement une baisse des kilomètres parcourus par le trafic motorisé.

4. Face aux *défis* en matière d'énergie et de climat, les *décisions ne souffrent plus aucun retard*, car nombre de mesures ne peuvent être réalisées à un coût avantageux que dans le cadre de réinvestissements. De plus, il faut du temps pour constituer le savoir-faire technique et entrepreneurial requis dans les différents domaines, tels que la planification, l'installation, la fabrication, l'exploitation et la maintenance. Ceci ne vaut pas seulement pour la Suisse et les autres pays industrialisés, mais aussi pour les pays en transition et émergents.
5. La poursuite d'une politique climatique et énergétique hésitante, telle que la Suisse et plusieurs États de l'OCDE la pratiquent depuis la fin des années 1990, fera *manquer des opportunités* dans le cycle de réinvestissement (p.ex. assainissements de bâtiments, nouvelles formes de production d'électricité) et débouchera sur une carence d'innovation, notamment pour ce qui touche à une utilisation plus efficace de l'énergie. Une telle politique réduit les chances à long terme de l'économie suisse dans la compétition internationale, tant au niveau des exportations, qui tendront à baisser, qu'à celui des importations, qui augmenteront pour les produits efficaces fournis par des pays qui auront adopté une politique énergétique et climatique consécutive.
6. En dépit de sa faible taille, *la Suisse a un rayonnement international considérable. Le haut niveau de la recherche et de l'éducation suisses renforce le potentiel mondial d'innovation*. La formation d'étudiantes et étudiants de pays émergents et en développement dans les hautes écoles suisses peut avoir de l'influence sur les futures décisions prises dans ces pays. Les parts d'exportation de technologies efficaces en énergie prennent une importance croissante ; c'est le cas par exemple pour les biens d'investissement, les technologies de transport et du bâtiment, les services énergétiques et financiers.
7. Grâce à sa capacité en matière de recherche en sciences naturelles et de l'ingénieur ainsi qu'en sciences sociales, la Suisse dispose d'un remarquable potentiel de *leader technologique* dans des domaines spécifiques des énergies renouvelables et de la conversion et utilisation efficace de l'énergie. Mais cela présuppose de la part des décideurs concernés le courage de fixer des conditions-cadres efficaces et axées sur le long terme. Il faut promouvoir et utiliser les compétences et la créativité existantes.
8. Les défis d'une utilisation de l'énergie et d'un approvisionnement énergétique conformes au développement durable ne doivent pas être compris comme relevant du seul domaine de la politique énergétique et climatique. Ils représentent aussi une chance pour la Suisse d'axer sa politique industrielle et d'innovation sur un usage efficace des ressources. Cette chance est encore trop peu reconnue par l'industrie des biens d'investissement, l'industrie chimique, le secteur du bâtiment et celui des finances.

## Bibliographie

- Aebischer B., Cattenazzi G. (2007) *Energieverbrauch der Dienstleistungen und der Landwirtschaft. Ergebnisse der Szenarien I bis IV*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- AIE (2006) *World Energy Outlook 2006*, International Energy Agency, OECD/IEA, ISBN 92-64-10989-7.
- AIE (2007) *Renewable Energy: RD&D Priorities*, International Energy Agency, OECD/IEA, ISBN 92-64-10955-2.
- ASST (1999) *CH50% – Eine Schweiz mit halbiertem Verbrauch an fossilen Energien*. SATW Bericht Nr. 30.
- ASST (2005) Kiener E. *Nachhaltige Energieversorgung*. SATW-Bericht Nr. 38, ISBN: 3-908235-10-3.
- ASST (2006) Berg M., Real M. *Road Map Erneuerbare Energien Schweiz. Eine Analyse zur Erschließung der Potenziale bis 2050*. SATW-Bericht Nr. 39, ISBN 3-908235-12-X.
- CASS (2002) *Nachhaltige Elektrizitätsversorgung*. Bericht der gleichnamigen CASS-Arbeitsgruppe, ISBN 3-907835-40-9.
- CIPRA (2004) *alpMedia Hintergrundbericht «Künstliche Beschneidung im Alpenraum»*. [www.cipra.org/de/alpmedia/dossiers/11](http://www.cipra.org/de/alpmedia/dossiers/11)
- European Commission (2006) *Action Plan for Energy Efficiency: Realising the Potential*. COM 545 final, Brussels.
- EEA (2004) *Impact of Europe's Changing Climate – An indicator-based assessment*. European Environmental Agency, Copenhagen, ISBN 92-9167-692-6.
- GIEC (2005) *Special Report on Carbon Dioxide Capture and Storage*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 13 978-0-521-68551-1.
- GIEC (2007a) *Climate Change 2007 – The Scientific Basis; Contribution of Working Group I to AR4 of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 978 0521 70596-7.
- GIEC (2007b) *Climate Change 2007 – Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to AR4 of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 978 0521 70597-4.
- GIEC (2007c) *Climate Change 2007 – Mitigation; Contribution of Working Group III to AR4 of the IPCC*. Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 978 0521 70598-1.
- Haugan P.A. and Joos F. (2004) *Metrics to assess the mitigation of global warming by carbon capture and storage in the ocean and in geological reservoirs*. Geophysical Research Letters, 31.
- Hirschberg S. et al. (2005) *Erneuerbare Energien und neue Nuklearanlagen: Potenziale und Kosten*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- Jakob M., Jochem E., Honegger A., Baumgartner A., Menti U., Plüss I. (2006) *Grenzkosten bei forcierten Energie-Effizienz-Massnahmen und optimierter Gebäudetechnik bei Wirtschaftsbauten*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- Jochem E., Andersson G., Favrat D., Gutscher H., Hungerbühler K., von Rohr R. P., Spreng D., Wokaun A., Zimmermann M. (2004) *Steps towards a sustainable development – A White Book for R&D of Energy-Efficient Technologies*. CEPE/ETH and novatlantis Zurich, Switzerland.
- OcCC (2000) *Bénéfices secondaires des réductions de gaz à effet de serre, Rapport de synthèse*, OcCC 2000, Berne.
- OcCC (2003) *Événements extrêmes et changements climatiques*, OcCC Berne, ISBN 3-907630-24-6.
- OcCC/ProClim (2007) *Les changements climatiques et la Suisse en 2050 – Conséquences pour l'environnement, la société et l'économie*. OcCC/ProClim, Berne, ISBN 978-3-907630-27-3.

- OECD (2007). *Examens environnementaux de l'OCDE*. Office fédéral de l'environnement. Berne.
- OFEN (2007a) *Perspectives énergétiques pour 2035 -tome 1. Synthèse*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- OFEN (2007b) *Die Energieperspektiven 2035 – Band 4. Exkurs Nr. 18: Kälte- und Hitzewellen*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- BP (2007) *BP Statistical Review of World Energy*. [www.bp.com/multipleimagesection.do?categoryId=9017892&contentId=7033503](http://www.bp.com/multipleimagesection.do?categoryId=9017892&contentId=7033503)
- OFEN/EMPA (2007) Zah R., Böni H., Gauch M., Hirschler R., Lehmann M. Wäger P. *Ökobilanz von Energieprodukten: Ökologische Bewertung von Biotreibstoffen*. Office fédéral de l'énergie, Berne.
- OFEV (2007) Jungbluth N., Steiner R., Frischknecht R. *Graue Treibhausgas-Emissionen der Schweiz 1990–2004. Erweiterte und aktualisierte Bilanz*. Umwelt-Wissen Nr. UW–0711. Bundesamt für Umwelt, Bern.
- ORNL (2006) *Online Trends – a compendium of data on global change*. <http://cdiac.ornl.gov/trends/trends.htm>
- ProClim (2005) *Canicule de l'été 2003 – Rapport de synthèse*. ProClim, Bern, ISBN 978-3-907630-16-7.
- Schär C., Vidale P. L., Lüthi D., Frei C., Haeberli C., Liniger M. A. und Appenzeller C. (2004) *The role of increasing temperature variability for European summer heat waves*. *Nature*, 427, 332-336.
- Scherrer S. C., Appenzeller C., Liniger M. A. (2006) *Temperature trends in Switzerland and Europe: Implications for climate normals*. *International Journal of Climatology*, 26, 565-580.
- Schwierz C., Heck P., Zenklusen E., Bresch D., Schär C., Vidale P. L., Wild M. (2007) *Modelling European winter wind storm losses in current and future climates*. *Journal of Climatic Change*, submitted.
- Science (2003) Review-Artikelserie *Tragedy of the Commons?* *Science*, 302: 1906–1929.
- Stern Report (2006) *The Economics of Climate Change – The Stern Review*. Cambridge University Press 2006. Voir aussi le résultat des recherches citées dans Review.
- Swiss Re (2006) *Natural catastrophes and man-made disasters 2005*. Sigma 2/2006.
- UNDP/WEC/DESA (2000) *World Energy Assessment*. UNDP New York, ISBN 92-1-126126-0.
- UN (2004) *World Population Prospects: The 2004 Revision, Vol. III, Analytical Report*. United Nations.
- UNFCCC (2005) *National Communications*.  
Schweiz: [http://unfccc.int/parties\\_and\\_observers/parties/items/2208.php](http://unfccc.int/parties_and_observers/parties/items/2208.php);  
Andere Nationen: [http://unfccc.int/national\\_reports/items/1408.php](http://unfccc.int/national_reports/items/1408.php)
- UVEK (2007) *Klimabericht – Bericht des UVEK über die zukünftige Klimapolitik der Schweiz*. Bern.
- WBGU (2007) *Welt im Wandel – Sicherheitsrisiko Klimawandel*. Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-540-73247-1.
- Weisz P. B. (2004) *Basic Choices and Constraints on Long-Term Energy Supplies*, *Physics Today*, 57, p 47ff.
- Zemp M., Haeberli W., Hoelzle M. and Paul F. (2006) *Alpine glaciers to disappear within decades?* *Geophysical Research Letters*, 33, L13504, doi:10.1029/2006GL026319.

## Glossaire et unités

### Application conjointe

Projet de protection du climat dans un Etat partie du Protocole de Kyoto qui a consenti un objectif d'émissions contraignant.

### Changements climatiques

Changements du climat se déroulant sur un long intervalle de temps. Alors que des effets naturels tels que les variations du rayonnement solaire et les éruptions volcaniques ont influencé le climat historique, les changements climatiques sont de plus en plus anthropiques, c'est-à-dire dominés par des activités humaines telles que les émissions de gaz à effet de serre.

### Co-bénéfices

Valeurs obtenues comme effets secondaires des investissements dans l'efficacité énergétique, p.ex. une plus haute qualité des produits, moins de rebut, une amélioration du confort domestique.

### Coûts d'adaptation

Coûts des investissements et mesures d'organisation que les ménages, les entreprises ou le secteur public réalisent pour éviter des pertes de confort, revers économiques et dommages dus aux changements climatiques.

### Coûts des dommages des changements climatiques

Des événements météorologiques extrêmes (canicules, ouragans, crues) ou l'évolution de particularités régionales (p.ex. les zones de pergélisol, les glaciers, la montée du niveau de la mer) entraînent des dommages immédiats ou à long terme qui sont à l'origine de coûts considérables et de souffrances humaines (p.ex. perte de biens et utilités, pertes de récoltes, maladie, mort, émigration, fuite).

### Coûts externes

Coûts externes de l'utilisation de l'énergie (p.ex. dommages de corrosion, aux récoltes et à la santé provoqués par des polluants atmosphériques, coûts d'adaptation aux changements climatiques, coûts

des dommages dus à des événements météorologiques extrêmes). Actuellement, ils ne sont pas compris dans les prix de l'énergie.

### Effet de serre

L'effet de serre repose sur le fait que le rayonnement solaire de courte longueur d'onde est absorbé par la surface de la Terre et réémis en partie sous forme de rayonnement (thermique) de grande longueur d'onde. Ce rayonnement thermique est presque entièrement absorbé par la vapeur d'eau et les gaz à effet de serre et réémis dans toutes les directions.

### Émissions grises de CO<sub>2</sub>

(en analogie à l'énergie grise)

Émissions de CO<sub>2</sub> lors de la fabrication, du transport et de l'entreposage d'un produit (produits semi-finis inclus) et lors de son élimination après usage (p.ex. construction et élimination d'une voiture). Elles ont lieu en dehors du pays dans lequel le produit est utilisé.

### Énergie finale

Les énergies finales sont en règle générale des agents énergétiques vendus dans le commerce, tels que le mazout, le gaz naturel, l'électricité, l'essence, le diésel, les pellets et copeaux de bois ou la chaleur à distance, destinés à des utilisateurs d'énergie dans les ménages, l'économie et les transports.

### Énergie primaire

L'énergie qu'un pays tire de la nature à l'intérieur de ses frontières ou importe de l'étranger. Le ravitaillement en carburant des transports internationaux par avion et bateau ne sont pas inclus dans l'énergie primaire.

### Énergie thermique

Dans la langue de tous les jours, l'énergie thermique est appelée chaleur. C'est l'énergie cinétique désordonnée contenue dans les atomes ou molécules. Dans les centrales thermiques, de l'énergie ther-

mique est soutirée à un gaz très chaud ou à la vapeur d'eau pour actionner une turbine.

### Énergie utile

Ces formes d'énergie sont requises à la fin d'une chaîne énergétique : p.ex. la chaleur d'un radiateur, la force motrice sur l'essieu d'un véhicule, la chaleur à haute température pour la fonte de l'acier, le courant électrique pour l'éclairage.

### Gaz à effet de serre

Les gaz à effet de serre absorbent le rayonnement de grande longueur d'onde dans l'atmosphère. Les gaz à effet de serre naturels les plus importants sont la vapeur d'eau et le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Les principaux gaz à effet de serre produits par l'être humain sont le CO<sub>2</sub> issu de la combustion de carbone fossile, le méthane (CH<sub>4</sub>) et, dans une moindre mesure, l'oxyde nitreux (gaz hilarant) et les hydrocarbures fluorés.

### IPCC scénarios

Scénario A2: orienté vers l'économie avec développement inégal du monde et démographie galopante dans les pays en voie de développement.

Scénario B1: orienté vers le développement durable avec mutation rapide vers une société des services et de l'information. Introduction rapide et globale de technologies efficaces.

### Internalisation des coûts externes

Des taxes ou impôts sur l'énergie permettent d'inclure (internaliser) les coûts externes dans les prix des agents énergétiques impliqués.

### Marché des certificats d'émission

Les droits d'émission peuvent être négociés entre propriétaires de ces certificats (p.ex. des entrepri-

ses, des pays). Il existe actuellement dans l'UE et dans quelques Etats des USA un marché de certificats d'émission entre entreprises exploitant des installations très énergétivores.

### Mécanisme pour un développement propre (MDP)

Il s'agit, comme dans le cas de l'application conjointe, d'un projet de protection du climat, qui se déroule cette fois dans un État partie du Protocole de Kyoto qui n'a pas adopté d'objectif d'émissions contraignant. En contrepartie des réductions d'émissions obtenues, comparées avec un projet de référence, le comité de l'ONU compétent délivre des certificats négociables qui peuvent être portés au compte d'autres États parties pour remplir leurs objectifs de réduction.

### Pic de production du pétrole/du gaz naturel

Moment où le maximum de production est atteint et à partir duquel la quantité produite diminue. Le pic de production du pétrole dépend de facteurs tels que le prix, la demande, la politique de production.

### Produit intérieur brut (PIB)

Somme des valeurs ajoutées de l'économie et du secteur public d'une économie nationale en un intervalle de temps donné (p.ex. une année).

### Services énergétiques

Situations et prestations souhaitées, qui nécessitent des solutions techniques consommant de l'énergie (p.ex. des maisons chauffées, la production de quantités données d'acier ou de papier, des déplacements en véhicules, la communication par des moyens techniques).

1 térawattheure (TWh) = 3.6 pétajoules (PJ)

1 tonne de CO<sub>2</sub> ~ 400 litres de pétrole ~ 500 Watt • année d'énergie thermique basée sur le pétrole

1 l de mazout extra-léger ~ 10 kWh d'énergie thermique

péta: 10<sup>15</sup> ; téra: 10<sup>12</sup> ; giga: 10<sup>9</sup> ; méga: 10<sup>6</sup>