

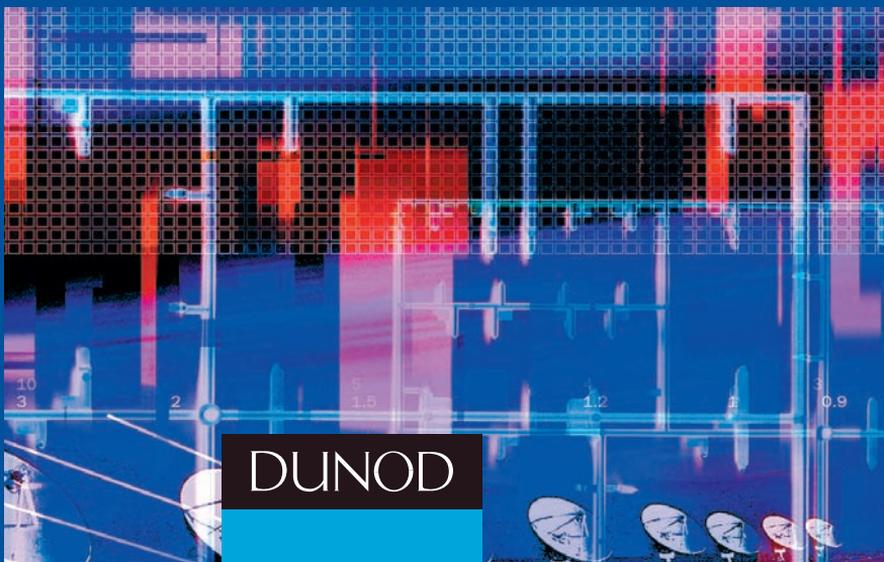


Francis Meunier

Domestiquer l'effet de serre

Énergies
et développement durable

UniverSciences



DUNOD

Domestiquer l'effet de serre

Consultez nos catalogues sur le Web

Ediscience
ETSF
InterEditions
Microsoft Press

Recherche --- Par Titre --- Collections Index thématique

Accueil Contacts

Sciences et Techniques Informatique Gestion et Management Sciences Humaines

Acheter

Interviews

 **Comme nous avons changé ! La saga inédite de 50 ans de bouleversements socioculturels**
Alain de Vulpien

 **Mars, planète de mythes, planète d'espoirs**
Francis Ricard

[toutes les interviews](#)

Événements

Saint-Valentin : j'aime mon couple... et je le signe ! Interview exclusive de H. Jaoul

En librairie ce mois-ci

Spécial Révisions scientifiques ! Pour réussir vos examens, lisez avec DUNOD et EDISCIENCE et gagnez des chèques-lire de 15€ !

[les librairies](#)

- Nouveautés - Nouveautés - Nouveautés -

 **Image numérique couleur**
De l'acquisition au traitement
Alain Trémeau,
Christine Fernandez-Maloigne,
Pierre Bonton

 **Risque Pays 2004**
Coface, Le Moci

 **Détection et prévention des intrusions IDS**
Thierry Evangelista

 **De quelle vie voulez-vous être le héros ?**
Tirer profit du passé pour réorganiser sa vie
Pierre-Jean De Jonghe

LES BIBLIOTHÈQUES DES MÉTIERS

- Gestion industrielle
- Métiers du vin
- Directeur
- d'établissement social et médico-social
- Toutes les bibliothèques

LES NEWSLETTERS

- Action sociale
- Entreprise
- Informatique et NTIC
- Documentation pour l'industrie
- Toutes les newsletters

[bibliothèques des métiers](#) [newsletters](#) [ediscience.net](#) [expert-sup.com](#)
Notice légale

www.dunod.com

Domestiquer l'effet de serre

Énergies
et développement durable

Francis Meunier

Professeur au CNAM

DUNOD

Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1^{er} juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



Nouveau tirage corrigé
© Dunod, Paris, 2005
ISBN 2 10 048754 X

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2^o et 3^o a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

A Christine, Nicolas et Lise

Table des matières

INTRODUCTION	1
---------------------	---

PARTIE A

L'ÉTAT DES LIEUX ET LES TENDANCES

CHAPITRE 1 • LE RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE ET LES PRÉVISIONS	5
---	---

1.1 Le cycle du carbone	7
-------------------------	---

1.1.1 Le cycle du carbone en régime stationnaire	7
--	---

1.1.2 Le cycle du carbone en régime transitoire	7
---	---

1.2 L'effet de serre	10
----------------------	----

1.2.1 L'effet de serre et ses conséquences	10
--	----

1.2.2 Vers quelle stabilisation en concentration en dioxyde de carbone ?	12
--	----

1.2.3 Les échéances pour les évolutions	13
---	----

CHAPITRE 2 • LES BESOINS CROISSANTS EN ÉNERGIE ET L'EFFET DE SERRE	17
---	----

2.1 Des besoins croissants en énergie	17
---------------------------------------	----

2.2 Le schéma alternatif de développement de l'AIE	24
--	----

2.3 L'augmentation de l'effet de serre : méfait ou signal d'alarme bénéfique ?	25
--	----

CHAPITRE 3 • LE CLIMAT « BIEN PUBLIC », ET L'ENVIRONNEMENT DANS LE DROIT CONSTITUTIONNEL	29
3.1 Le climat « bien public »	29
3.2 L'environnement inscrit dans la Constitution française	31
3.3 Les permis d'émission	32

PARTIE B

DES SOLUTIONS TECHNIQUES POUR DOMESTIQUER L'EFFET DE SERRE

CHAPITRE 4 • L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE	37
4.1 La production d'électricité	39
4.1.1 Augmentation du rendement grâce au cycle combiné	41
4.1.2 Augmentation du rendement grâce à la cogénération	42
4.1.3 Réduction des émissions de CO ₂ par substitution de combustible	45
4.1.4 Notre scénario alternatif pour la production d'électricité	45
4.2 Les transports	48
4.3 Les autres secteurs (industrie, habitat, tertiaire, commercial, etc.)	52
4.4 Conclusion sur l'utilisation rationnelle de l'énergie	55
CHAPITRE 5 • LES ÉNERGIES NON FOSSILES	57
5.1 Les énergies renouvelables	57
5.1.1 La biomasse	57
5.1.2 L'énergie éolienne	68
5.1.3 L'énergie solaire thermique	71
5.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque	78
5.1.5 La géothermie	82
5.1.6 L'hydraulique et autres énergies renouvelables	85
5.1.7 Bilan des énergies renouvelables à l'horizon 2030	85
5.1.8 Maîtriser l'effet de serre grâce aux ENR	86
5.1.9 Conclusion sur les ENR	89
5.2 L'énergie nucléaire	91
5.2.1 Les inconvénients de l'énergie nucléaire	92
5.2.2 Les avantages de l'énergie nucléaire	95
5.2.3 Quel avenir pour l'énergie nucléaire ?	96

CHAPITRE 6 • LES PUIITS DE CARBONE (OU DE CO₂)	99
6.1 Capture assistée du dioxyde de carbone par la biosphère	100
6.1.1 Reboisement et cultures énergétiques à haut rendement	100
6.1.2 Traitement des déchets agricoles et urbains	102
6.2 Capture à la source des émissions de dioxyde de carbone et séquestration	104
6.2.1 La capture du CO ₂	104
6.2.2 La séquestration du CO ₂	106
6.2.3 La réutilisation du CO ₂	110
6.2.4 Conclusion sur les puits de CO ₂	110
CHAPITRE 7 • LE SURCÔÛT DE LA LUTTE CONTRE L'EFFET DE SERRE	113
7.1 Coût des combustibles fossiles pour la maîtrise de l'effet de serre	114
7.2 Qui doit payer la lutte contre l'effet de serre ?	115
7.3 Un choix de société	118
CONCLUSION : VERS QUEL AVENIR ÉNERGÉTIQUE ?	121

ANNEXES

ANNEXE I • THERMODYNAMIQUE DE L'EFFET DE SERRE	131
I.1 Évaluation des flux d'énergie à la surface de la terre	131
I.1.1 Bilan en régime permanent	132
I.1.2 Bilan en régime transitoire	134
I.2 Le forçage radiatif	135
I.2.1 Forçage radiatif positif lié à l'effet de serre cumulé	135
I.2.2 Forçage radiatif négatif dû à l'utilisation des ENR	137
I.3 Condition pour la maîtrise de l'effet de serre	138
ANNEXE II • LES CYCLES THERMODYNAMIQUES POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ	141
ANNEXE III • LA COGÉNÉRATION	145

ANNEXE IV • LA COMBUSTION	149
ANNEXE V • LES POMPES À CHALEUR	151
V.1 Pompes à chaleur électriques	151
V.2 Systèmes à énergie totale (thermo-frigopompes)	154
V.3 Pompes à chaleur thermiques à sorption	154
ANNEXE VI • CANICULE ET RÉCHAUFFEMENT PLANÉTAIRE	157
VI.1 Climatisation et canicule	159
VI.2 Utilisation intensive de l'énergie solaire intégrée à l'habitat	160
VI.3 Utilisation de la cogénération pour la climatisation	161
ANNEXE VII • UNITÉS ET NOTATIONS UTILISÉES	163
VII.1 Unités	163
VII.1.1 L'énergie	163
VII.1.2 Autres unités	164
VII.2 Sigles et abréviations	164
BIBLIOGRAPHIE	167
INDEX	169

Introduction

Après avoir découvert l'effet de serre il y a une vingtaine d'années, les climatologues ont entrepris de modéliser l'évolution climatique et certains prédisent un avenir apocalyptique s'il continue à progresser au même rythme. Sur la base de ces prévisions, les économistes ont préconisé des mesures qui ont conduit, notamment, au protocole de Kyoto visant à contrôler les émissions de gaz à effet de serre.

Néanmoins, comme son nom l'indique clairement en français, l'effet de serre est un « effet », c'est-à-dire qu'on ne pourra le combattre que si l'on s'attaque efficacement à ses causes. Celles-ci ont été maintenant bien identifiées : ce sont essentiellement les émissions de gaz à effet de serre dues à l'activité humaine. Pour combattre l'effet de serre, il s'agit donc de mobiliser les compétences d'ingénieurs et de techniciens dans les différents procédés responsables de ces émissions afin de les réduire sans toutefois brider l'activité humaine. Il n'est, en effet, pas question de freiner l'aspiration légitime au développement. L'objectif doit être plus ambitieux : il s'agit de maîtriser l'effet de serre en le domestiquant afin de permettre la croissance de l'activité humaine résultant à la fois de la croissance démographique et de l'aspiration légitime au bien être de la majorité de la population des pays émergents.

Nous verrons que pour relever ce défi il est indispensable de mettre en place une stratégie nouvelle faisant appel au développement durable.

Cette stratégie devra s'appuyer sur l'état de l'art en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre :

- utilisation rationnelle de l'énergie ;
- développement d'énergies alternatives ne contribuant pas à l'effet de serre ;
- si besoin, capture puis séquestration de CO₂.

En particulier, le recours massif aux énergies renouvelables permettra de contrer l'effet de serre en produisant un *forçage négatif*, opposé au *forçage radiatif positif* de l'effet de serre. C'est la possibilité de ce forçage négatif qui permet d'affirmer que l'effet de serre n'est pas irréversible et ne représente pas un danger d'apocalypse programmée pour les générations futures.

Nous montrerons qu'une telle stratégie pourrait conduire à un nouvel équilibre, qui permettrait de concilier les besoins croissants en énergie avec une teneur élevée en gaz à effet de serre, et cela sans effets climatiques désastreux.

On pourra alors affirmer que l'effet de serre aura été domestiqué.

PARTIE A

L'ÉTAT DES LIEUX ET LES TENDANCES

Après de nombreuses controverses, liées à la précision des mesures notamment, le réchauffement planétaire dû à l'activité humaine est maintenant un fait acquis. Cette prise de conscience a amené les climatologues à se pencher sur ce problème et à développer des modèles détaillés qui prennent en compte l'activité humaine. Ces modèles sont validés par l'évolution climatique connue et prédisent l'évolution à venir en fonction des hypothèses sur l'activité humaine future. L'analyse de la consommation énergétique dans l'avenir est effectuée notamment par l'AIE (Agence internationale de l'énergie, ou International environment agency (IEA) en anglais). Les modèles des climatologues alimentés par des projections de population et de consommation énergétique permettent de dégager des grandes tendances d'évolution climatique suivant le mode de développement retenu au niveau planétaire. Ces travaux ont permis d'attirer l'attention des décideurs sur les dangers qui pèsent, à moyen terme, sur notre planète. Les auteurs de ces études réclament des actions rapides afin d'éviter le pire. D'ores et déjà des mesures ont été prises visant à limiter l'amplitude de l'évolution du climat. Ces mesures sont souvent considérées comme étant insuffisantes compte tenu de la gravité des dangers annoncés.

C'est cet état des lieux général qu'il nous semble important de dresser avant d'aborder la partie de cet ouvrage consacrée à l'étude des solutions techniques susceptibles de domestiquer l'effet de serre.

Chapitre 1

Le réchauffement planétaire et les prévisions

L'amplitude du réchauffement planétaire est, pour le moment, très faible, puisqu'il est de l'ordre de 0,6 °C. Néanmoins, la source d'inquiétude réside moins dans l'observation actuelle que dans les prévisions de l'évolution à venir. En effet, ce réchauffement planétaire est majoritairement dû à la consommation de combustibles fossiles et aux augmentations des concentrations atmosphériques des principaux gaz à effet de serre (GES) que sont le dioxyde de carbone CO_2 , le méthane CH_4 et le peroxyde d'azote N_2O (figure 1.1).

La figure 1.1 fait clairement apparaître les croissances des concentrations (échelles de gauche) en dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4) et peroxyde d'azote (N_2O) depuis le début du XIX^e siècle et l'accélération de cette croissance au XX^e siècle. Sur l'échelle de droite de la figure 1.1, apparaissent les contributions au *forçage radiatif* de ces émissions. Ce forçage radiatif (annexe I) est une mesure de la contribution de l'espèce chimique considérée à l'effet de serre, et donc au réchauffement planétaire. En 2000, le forçage radiatif total était de 2,43 W/m², celui du dioxyde de carbone de 1,46 W/m², soit environ 62 % du total, et celui du méthane de 0,48 W/m², soit environ 21 % du total. Nous verrons plus loin que les prédictions prévoient une augmentation conséquente de ces concentrations, et donc du forçage

radiatif associé. Le dioxyde de carbone représentant la principale contribution au forçage radiatif, il est normal que la lutte contre ses émissions soit prioritaire. Néanmoins, compte tenu de la part importante du méthane, nous insisterons plus loin sur le soin particulier à attacher au traitement des déchets agricoles et urbains qui en constituent la principale source d'émissions.

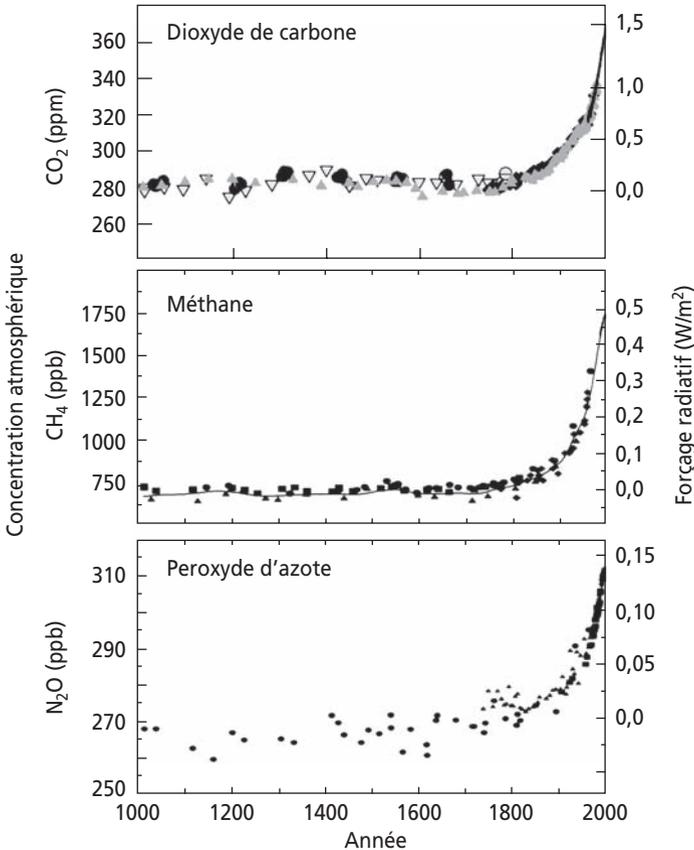


Figure 1.1 Évolution des concentrations atmosphériques en dioxyde de carbone (CO_2), méthane (CH_4) et peroxyde d'azote (N_2O) et forçage radiatif associé.

ppm : parties par million ; ppb : parties par milliard (*billion*).
D'après le GIEC [1].

Toutes les anticipations prévoient un accroissement de la consommation de combustibles fossiles et donc une augmentation du stock de carbone dans l'atmosphère. Nous commencerons donc par un nécessaire rappel sur le cycle du carbone en régime permanent, ainsi que sur les bilans de carbone en régime transitoire (d'abord durant la période géologique de stockage, puis sur la période actuelle de déstockage).

1.1 LE CYCLE DU CARBONE

1.1.1 Le cycle du carbone en régime stationnaire

Les plantes vertes produisent des sucres $(\text{CH}_2\text{O})_n$ par photosynthèse à partir de dioxyde de carbone et d'eau et grâce au rayonnement solaire.

Ces sucres sont ensuite transformés en différentes molécules qui constituent les végétaux. Cette masse de carbone fixée dans les plantes peut soit contribuer à augmenter le stock de carbone dans la végétation, soit être consommée par les êtres vivants herbivores, soit se décomposer et retourner partiellement dans l'atmosphère (généralement sous forme de méthane).

En régime stationnaire, l'écosystème n'échange pas de carbone avec l'extérieur et les différents flux sont constants. Ainsi le carbone absorbé par photosynthèse par une plante est égal au carbone restitué à l'atmosphère à la fin de sa vie. Avec un tel cycle en régime permanent, il n'y a pas accumulation de carbone, que ce soit dans la végétation, dans le sol, dans l'atmosphère, ou encore dans les océans.

1.1.2 Le cycle du carbone en régime transitoire

La situation décrite précédemment où les flux absorbés et émis s'équilibrent est une situation assez exceptionnelle qui résulte d'une très longue évolution. L'histoire de notre planète a connu deux régimes transitoires : le régime transitoire de l'accumulation de carbone dans le sol, la végétation et les fonds marins correspondant aux temps géologiques, et la période, qui commence seulement, de déstockage des combustibles fossiles.

a) *Le régime transitoire de l'accumulation du carbone*

Selon Bernard Saugier [2], avant l'apparition de la vie sur la terre, l'atmosphère était quinze à vingt fois plus riche en dioxyde de carbone qu'aujourd'hui et ne contenait que très peu d'oxygène. Avec l'apparition

de la photosynthèse, il y a eu capture du carbone de l'atmosphère et transfert dans des sédiments, dont l'accumulation a donné naissance aux combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Par ailleurs le développement de la végétation a provoqué la libération par les racines des ions de calcium des roches, qui ont été entraînés vers les océans par les rivières. Ces ions de calcium se sont combinés avec le dioxyde de carbone dissous dans l'eau pour former des précipités qui se sont accumulés, contribuant à augmenter encore le stock de carbone dans les fonds marins.

Ce régime transitoire s'est donc traduit par un déstockage du carbone de l'atmosphère (et donc une diminution de la concentration en CO_2), et par des stockages dans la végétation, dans les gisements de combustible fossile et dans les fonds marins. Durant cette période d'accumulation, la capture du carbone était très supérieure à sa réémission car la teneur en CO_2 dans l'atmosphère était élevée (figure 1.2).

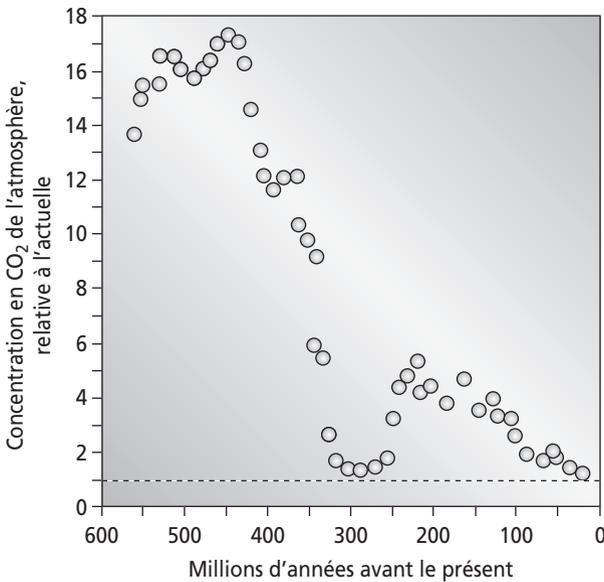


Figure 1.2 La concentration de dioxyde de carbone atmosphérique au cours des temps géologiques.

Source : Saugier [2], d'après Berner, *American journal of science*, n° 294, 1994.

Mais au fur et à mesure que la concentration atmosphérique en CO₂ a diminué, on a tendu vers un équilibre où la capture du carbone atmosphérique (CO₂) compensait exactement l'émission de carbone (CO₂ mais également méthane). Peu ou prou, c'est la situation qui existait avant le début de l'industrialisation. L'estimation des stocks actuels de carbone est la suivante :

- atmosphère : 750 milliards de tonnes ;
- végétation : 550 milliards de tonnes ;
- sols : 1 500 milliards de tonnes ;
- océans : 38 000 milliards de tonnes ;
- **total : 41 400 milliards de tonnes.**

Un tel équilibre dépend évidemment des sources et des puits de carbone : la conservation de la masse implique que la quantité de carbone est constante, mais c'est la répartition entre l'atmosphère et les trois autres réservoirs (végétation, sol et océans) qui va dépendre de leurs échanges mutuels. C'est ici que réside tout le problème. Avec l'industrialisation et l'utilisation par l'homme des combustibles fossiles, il y a émission de CO₂ dans l'atmosphère à partir de la combustion de ces derniers. Si cette émission de CO₂ n'est pas compensée par un puits de CO₂ provenant de la végétation, du sol ou des océans, on se dirige inéluctablement vers un équilibre différent. C'est ainsi qu'à l'heure actuelle, les flux de carbone entre ces différents réservoirs étant déséquilibrés, il y a déplacement de l'équilibre initial.

Avant de passer à l'examen de la période actuelle de déstockage, il est important d'observer l'échelle de temps. La forte réduction de 18 à 1 de la concentration relative de dioxyde de carbone par rapport à la concentration actuelle s'est effectuée sur une période d'environ 150 millions d'années, et la faible valeur de la concentration de CO₂ il y a 300 millions d'années est associée à une longue période glaciaire de 50 millions d'années. Par ailleurs, la baisse au tertiaire (il y a 65 millions d'années) de la teneur en dioxyde de carbone coïncide avec l'émergence de plantes qui sont capables d'utiliser efficacement de faibles concentrations en dioxyde de carbone. Actuellement la production végétale est estimée à environ 60 milliards de tonnes de carbone par an.

b) Le régime transitoire de déstockage du carbone

Nous avons vu que le stockage du carbone dans la végétation, le sol et les océans a mis des millions d'années à s'opérer. Or depuis le début de l'industrialisation (un siècle et demi), le déstockage des combustibles

fossiles s'effectue à un rythme accéléré. Si aucune mesure n'était prise, le déstockage actuel pourrait se traduire par un épuisement des ressources en pétrole dans un demi-siècle, un épuisement des ressources en gaz naturel d'ici à la fin du siècle et un épuisement des ressources en charbon dans quelques siècles. Le problème de ce déstockage est qu'il se traduirait inéluctablement par une augmentation considérable de la concentration en dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les estimations du GIEC (Groupe international d'experts sur le climat, ou International panel on climate change (IPCC) en anglais) [1] et de l'AIE [3] conduisent à un scénario où l'on aurait en 2100 des émissions de dioxyde de carbone qui seraient dix fois celles de 1990. Suivant les scénarios énergétiques sélectionnés par le GIEC, l'AIE prévoit que pendant ce siècle ce sont entre 400 et 1 600 milliards de tonnes de carbone qui seront émises, et, au rythme des émissions actuelles, plus vraisemblablement de l'ordre de 850 milliards de tonnes. En deux siècles et demi depuis le début de l'ère industrielle, l'émission totale aura vraisemblablement été supérieure à ce que l'atmosphère contient actuellement de carbone (environ 750 milliards de tonnes). C'est dire à quel point un déséquilibre considérable est en train de s'établir.

Les conséquences de telles émissions, dix fois celles de 1990, seraient dramatiques, si bien que l'on peut affirmer sans risque d'erreur que des mesures seront prises suffisamment tôt pour que ce scénario ne se produise pas. Néanmoins, et nous y reviendrons plus tard, le déstockage du carbone s'accélère, et les simulations du GIEC prévoient que la concentration de dioxyde de carbone en 2100 devrait se situer entre 550 et 950 ppm, soit entre le double et le quadruple de la teneur d'avant l'ère industrielle. Cette évolution rapide en moins de trois siècles est à rapprocher de l'évolution sur plusieurs millions d'années observée dans la phase du stockage du carbone dans les temps géologiques.

1.2 L'EFFET DE SERRE

1.2.1 L'effet de serre et ses conséquences

L'effet de serre est un mécanisme naturel qui provient du fait que l'atmosphère contient des molécules possédant la propriété d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la terre. Ce rayonnement capté modifie le bilan énergétique de la planète. À l'heure actuelle, parmi les éléments présents dans l'atmosphère qui absorbent le rayonnement

infrarouge, il faut d'abord citer la vapeur d'eau, puis des substances comme le dioxyde de carbone, le méthane et les autres hydrocarbures, les oxydes d'azote (NO_x), les composés halogénés (CFC, HCFC, HFC...), etc.

Il faut distinguer l'effet de serre naturel, qui préexistait avant l'ère industrielle, de l'effet de serre renforcé par l'activité humaine. Cet effet de serre naturel est en effet extrêmement bénéfique. En l'absence d'effet de serre, la température moyenne sur la terre serait seulement de $-18\text{ }^\circ\text{C}$, ce qui y rendrait la vie problématique. C'est l'existence de l'effet de serre naturel qui a porté la température moyenne sur la terre à $15\text{ }^\circ\text{C}$ et rend notre planète facilement habitable. Mais les émissions récentes (depuis un siècle et demi) et en quantité croissante de gaz à effet de serre entraînent un forçage radiatif qui se traduit par une élévation de température de la terre (annexe I). Cette élévation de température est encore très faible, environ $0,6\text{ }^\circ\text{C}$, mais les modèles prévoient qu'elle pourrait atteindre 5 à $6\text{ }^\circ\text{C}$ environ en 2100. (figure 1.3).

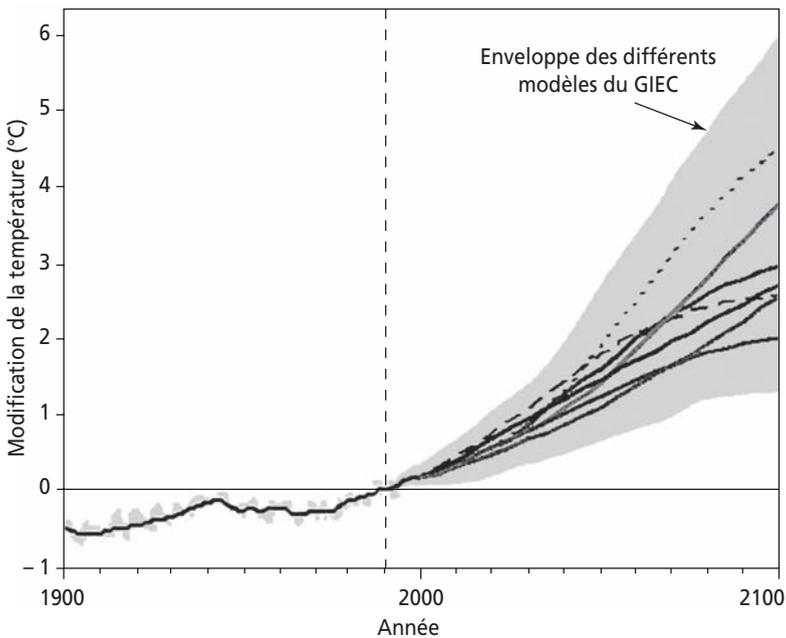


Figure 1.3 Modification de la température de la surface de la terre observée jusqu'en 1990 et prédite à partir de différents modèles jusqu'en 2100.

D'après le GIEC [1].

Si un tel réchauffement se produisait, les conséquences seraient dramatiques (désertification de nombreux continents, élévation du niveau de la mer, ce qui engloutirait de nombreuses régions côtières, comme par exemple une partie du Bangladesh, voire des pays entiers comme dans le Pacifique, où de nombreuses îles sont menacées).

Ceci entraînerait par ailleurs un déplacement des isothermes sur la surface du globe à une vitesse telle qu'il est vraisemblable que les espèces végétales et animales sauvages ne sauraient pas s'adapter. C'est ainsi qu'une récente étude publiée dans la revue *Nature*, largement reprise par la presse, démontre que le quart des espèces animales terrestres pourrait être éradiqué d'ici à 2050. Cet effet accélérerait encore le phénomène de désertification.

Par ailleurs, le bilan énergétique à la surface de la terre montre que l'augmentation de l'énergie disponible peut se traduire par de la chaleur, et donc une élévation de la température, mais aussi par une dissipation sous forme d'énergie cinétique (annexe I). Les tempêtes et autres cyclones peuvent ainsi être envisagés comme des conséquences de l'effet de serre. Ce point fait l'objet d'études aux conclusions controversées quant à la localisation de ces effets, néanmoins, tout semble indiquer que le réchauffement planétaire s'accompagnera d'un renforcement des tempêtes, ouragans et cyclones.

Encore une fois, ce scénario catastrophe ne se produira pas si des mesures adéquates sont prises. Il y a néanmoins urgence. Là est l'enjeu : que faire pour que les scénarios catastrophes (de type BAU, *business as usual*, par exemple, c'est-à-dire sans modification des pratiques) ne se produisent pas ?

Nous reviendrons plus loin sur cet effet de serre produit par l'homme pour en analyser les effets et envisager comment il pourrait être appri-voisé.

1.2.2 Vers quelle stabilisation en concentration en dioxyde de carbone ?

La question qui se pose est : à quelle concentration va-t-on pouvoir obtenir une stabilisation ? Nous reviendrons plus loin plus en détail sur ce point essentiel. Néanmoins, on peut d'ores et déjà assurer qu'une stabilisation à une valeur inférieure à 450 ppm est exclue. Analysant les documents du GIEC, l'AIE [3] conclut que pour stabiliser la concentration de dioxyde de carbone à 550 ppm, il faudrait que les émissions retombent au niveau de celles de 1990 dans moins d'un siècle. En revanche, si les émissions ne retombaient au niveau de celles

de 1990 que dans deux siècles, la concentration de dioxyde de carbone atteindrait 1 000 ppm, ce qui est inacceptable. Cette remarque permet de situer de façon assez précise l'ampleur de l'effort à accomplir. L'hypothèse d'une stabilisation à 550 ppm est réaliste, comme nous le verrons plus loin ; de plus, elle est cohérente car elle correspond à des émissions cumulées égales à 850 ± 300 GtC au cours du XXI^e siècle, ce qui correspond à peu près aux réserves fossiles conventionnelles prouvées. C'est la base sur laquelle nous partirons pour fixer des objectifs et un calendrier de réduction.

1.2.3 Les échéances pour les évolutions

Les modèles sur l'évolution climatique, développés à l'échelle internationale et rassemblés par le GIEC, montrent que l'évolution prédite de la température n'est pas linéaire et qu'elle dépend fortement des scénarios de développement. C'est ainsi qu'un scénario basé sur une utilisation intensive des combustibles fossiles (scénario A1F1 sur les figures 1.4 et 1.5) conduit à un réchauffement qui s'accélère au cours du temps. En revanche un scénario basé sur une contribution importante de procédés propres et d'énergie renouvelable (ENR) conduit à un réchauffement initial presque linéaire suivi d'une stabilisation et d'une éventuelle diminution à la fin du siècle (scénario B1-A1T sur les figures 1.4 et 1.5).

À l'exception du scénario B1 (procédés propres et énergies alternatives) qui prévoit une concentration en CO₂ inférieure à 600 ppm en 2100, tous les autres prévoient une concentration supérieure ou égale à cette valeur. Il est intéressant de noter que le scénario A1T, qui fait appel aux énergies alternatives, conduit en 2100 à une concentration en CO₂ supérieure au scénario B1, qui, de son côté, fait plutôt appel aux économies d'énergie. C'est la raison pour laquelle, dans la suite, nous privilégierons une politique résolument tournée rapidement vers les économies d'énergie.

Tous les scénarios prévoient une élévation de température par rapport à 1990 qui devrait atteindre environ 0,7 °C en 2010, et entre 1 et 1,3 °C en 2030. Un point important est que le réchauffement planétaire, pour perceptible qu'il commence à être, va se poursuivre, quoi qu'il arrive, à un rythme constant (environ 0,2 à 0,4 °C supplémentaire par décennie) pendant une vingtaine d'années. À ce rythme, l'échauffement restera vraisemblablement tolérable pendant deux à trois décennies. En revanche, si rien n'est fait, le réchauffement va s'accélérer dans environ 20 ans pour rapidement devenir insupportable.

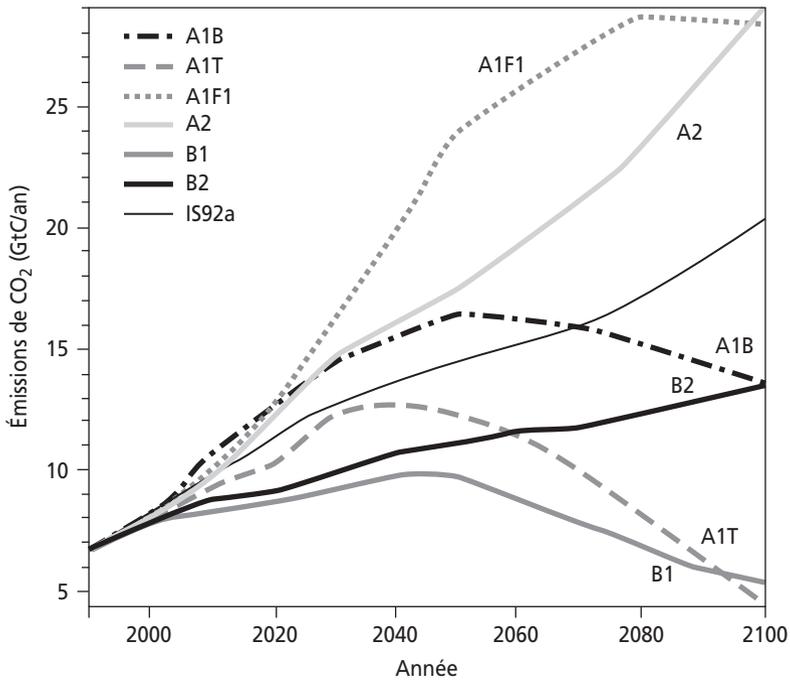


Figure 1.4 Évolution des émissions de CO₂ suivant différents scénarios.

B1 : introduction de procédés propres et énergétiquement efficaces ; B2 : solutions locales économiquement et environnementales ; A1T : énergies alternatives (non fossiles) ; A1B : compromis entre toutes les sources d'énergie ; A1F1 : recours intensif aux combustibles fossiles ; A2 : développement très hétérogène avec de grandes différences régionales et un fort accroissement démographique ; IS92a : modèle de référence (proche de BAU).
Source : GIEC [1].

Il est intéressant de noter que, d'après les résultats des modèles (figures 1.4 et 1.5), le maximum de la concentration en dioxyde de carbone comme le maximum de la température surviennent approximativement cinquante ans après le maximum des émissions. C'est ainsi que sur la figure 1.4 on observe qu'avec les scénarios B1 et A1T les maxima d'émissions de dioxyde de carbone sont prévus vers 2030-2040 et que la stabilisation de la concentration en dioxyde de carbone (figure 1.5) commence vers 2080 à une valeur de l'ordre de 550 ppm. D'après cette constatation, les émissions étant toujours croissantes à

l'heure actuelle, on peut affirmer que le maximum de concentration en dioxyde de carbone (et donc de température) sera atteint après 2050. C'est ce qui permet à l'AIE d'affirmer que pour stabiliser la concentration en dioxyde de carbone à 550 ppm, il faut que les émissions atteignent leur maximum vers 2020-2030 et retombent au niveau des émissions de 1990 avant 2100. C'est en effet ce que permettent – à peu près – les scénarios B1 et A1T, qui font largement appel aux énergies alternatives. En revanche, le scénario A1B qui représente un compromis entre toutes les formes d'énergie conduirait en 2100 à une concentration en CO_2 proche de 700 ppm et à une élévation de température proche de 3°C .

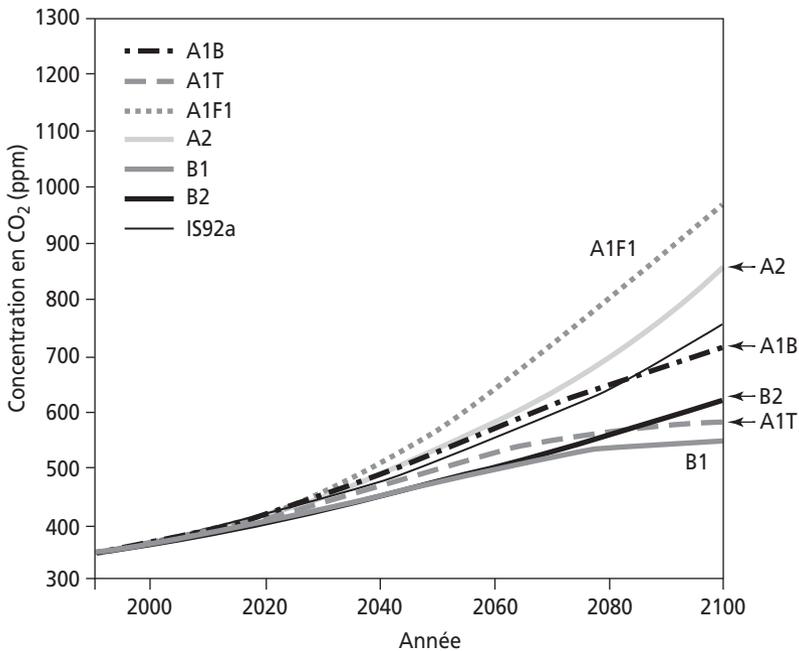


Figure 1.5 Évolution de la concentration en CO_2 suivant les différents scénarios (voir légende figure 1.4).

Source : GIEC [1].

Ces considérations permettent d'établir un calendrier pour la mise en œuvre des mesures visant à réduire les émissions de GES, à savoir les économies d'énergie, le développement des énergies renouvelables

ainsi que le développement des techniques de capture et de séquestration de dioxyde de carbone. C'est notamment à ce type de prédictions que s'intéresse le GIEC pour transmettre *via* l'ONU ses recommandations aux pouvoirs publics.

Ce rythme d'évolution nous incite à penser que l'on dispose d'une vingtaine d'années pour adopter une nouvelle stratégie vis-à-vis de l'effet de serre et développer les technologies adéquates. D'un côté, on peut dire qu'il y a urgence mais d'un autre côté, on peut également affirmer qu'il existe un espace pour des réactions adéquates. Avant d'aborder les nouvelles technologies qui seraient appropriées pour maîtriser l'effet de serre, il est essentiel de s'attarder sur le bilan énergétique de l'effet de serre sur notre planète terre et sur ses conséquences.

Chapitre 2

Les besoins croissants en énergie et l'effet de serre

2.1 DES BESOINS CROISSANTS EN ÉNERGIE

L'industrialisation a généré une amélioration des conditions de vie, ce qui a entraîné une augmentation de la consommation d'énergie. C'est ainsi que depuis 1970 la consommation annuelle d'énergie primaire a doublé (pour passer de 5 000 à près de 10 000 Mtep), et qu'il est prévu qu'elle atteigne 15 000 Mtep en 2030, et de 20 000 à 45 000 Mtep, suivant les scénarios, en 2100 (figure 2.1).

Il n'est pas dans l'objectif de cet ouvrage de discuter si cette augmentation de la consommation d'énergie est toujours justifiée ou non (bien qu'un tel débat mérite certainement d'être mené). Ces prévisions sont basées sur des scénarios d'évolution des populations et de développement économique ; le tableau 2.1 présente les prévisions utilisées par l'AIE pour les modèles développés dans son ouvrage *World energy outlook* publié en 2002 [5]. Si les hypothèses retenues par l'AIE pour les croissances économique et démographique se confirment, des bouleversements géopolitiques sont à attendre dans les prochaines

décennies¹. C'est ainsi que d'après le tableau 2.1 l'AIE prévoit qu'en 2030 la Chine sera la première puissance économique en terme de PNB, suivie des États-Unis et de l'Europe des 15. L'Europe des 25 devrait devancer les États-Unis. En revanche, le PNB par habitant d'un Chinois sera encore trois fois plus faible que celui d'un Américain, alors qu'en 2000 il était presque dix fois inférieur. À noter que le PNB par habitant d'un Européen, aujourd'hui inférieur de moitié à celui d'un Américain, l'égalera en 2030.

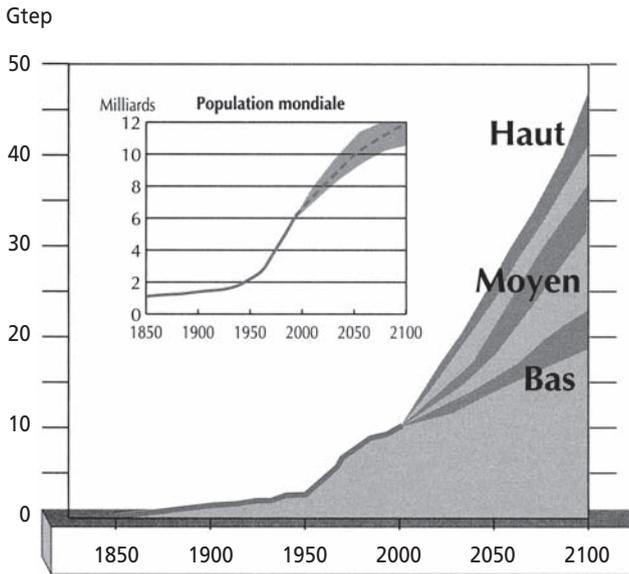


Figure 2.1 Prévision d'évolution de la consommation mondiale d'énergie et de la population mondiale jusqu'en 2100.

D'après le CEA, *Informations sur l'énergie*, 2003 [4]., et l'IIASA, 1995.

1. Les hypothèses de croissance retenues par l'AIE sont scindées en deux phases : de 2000 à 2010, puis de 2010 à 2030. Les taux retenus pour chacune de ces périodes sont respectivement de 2,5% et 2,3% pour les États-Unis, 2 % puis 1,8 % pour l'Europe des 15, et 5,7 % puis 4,3 % pour la Chine. En 2004, le taux de croissance américain (entre 4 et 5%) est environ le double de celui de l'Europe des 15, alors que le taux de croissance chinois est supérieur à 7 % après avoir approché les 10 % en 2003.

TABLEAU 2.1 POPULATION (EN MILLIONS D'HABITANTS), PNB (EN MILLIARD DE DOLLARS 1995)
ET PNB PAR HABITANT (EN MILLIERS DE DOLLARS 1995) CONSTATÉS ET PRÉVUS JUSQU'EN 2030 POUR DIFFÉRENTS PAYS.

Pays	1971			2000			2010			2030		
	Pop	PNB	PNB/hab	Pop	PNB	PNB/hab	Pop	PNB	PNB/hab	Pop	PNB	PNB/hab
États-Unis/Canada	230	3 927	17,1	306	9 804	32	334	12 506	37,5	387	17 693	45,8
Union européenne (15 pays)	343	4 096	12	377	8 241	22	378	10 326	27,3	367	14 693	45,8
Japon/Australie/ Nouvelle-Zélande	121	1 436	12	150	3 590	24	153	4 200	27,4	150	5 717	38
Chine	845	493	0,58	1 272	4 861	3,8	1 363	8 484	6,2	1 481	19 753	13,3
Russie				149	1 086	7,5	140	1 445	10,3	124	2 604	21
Inde	560	570	1,0	1 014	2 279	2,25	1 164	3 722	3,2	1 409	8 787	6,24
Brésil	98	383	3,9	170	1 178	6,9	192	1 577	8,2	229	2 779	12,1
Monde				6 000						8 200		

Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

TABLEAU 2.2 CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE (EN MTEP) ET ÉMISSIONS DE CO₂ (EN MT) CONSTATÉES (1971 ET 2000) ET PRÉVUES JUSQU'À 2030.

Pays	1971		2000		2010		2020		2030	
	Conso. énergie	CO ₂ émis	Conso. énergie	CO ₂ émis*	Conso. énergie	CO ₂ émis*	Conso. énergie	CO ₂ émis*	Conso. énergie	CO ₂ émis*
Amérique du Nord, dont : États-Unis + Canada	1 175 1 736	4 769 4 672	2 696 2 551	6 535 6 175 (+ 16,4)	3 040 2 854	7 300 6 840 (+ 29)	3 391 3 152	8 258 7 670 (+ 44,6)	3 726 3 420	9 075 8 327 (+ 57)
Union européenne (15 pays)	1 041	3 015	1 456	3 146 (+ 1,1)	1 625	3 422 (+ 10)	1 729	3 689 (+ 18,6)	1 811	3 829 (+ 23,1)
Japon/Australie/Nouvelle- Zélande	329	900	653	1 513 (+ 16,4)	737	1 657 (+ 27,5)	796	1 723 (+ 32,6)	823	1 701 (+ 30,9)
Économies européennes en transition	865	2 281	1 024	2 488 (- 34,3)	1 220	3 041 (- 19,7)	1 373	3 374 (- 10,9)	1 488	3 646 (- 3,7)
Russie			612	1 492 (- 32,6)	733	1 829 (- 17,3)	841	2 068 (- 6,5)	918	2 241 (+ 1,3)
PED, dont :	657	2 018	2 732	7 782 (+ 45,6)	3 773	10 612 (+ 98,6)	5 031	14 042 (+ 162,8)	6 487	18 118 (+ 239,1)
Chine	241	812	950	3 052 (+ 33,3)	1 302	4 155 (+ 81,5)	1 707	5 393 (+ 135,5)	2 133	6 718 (+ 193,4)
Inde	62	203	300	937 (+ 60,7)	413	1 279 (+ 119,2)	567	1 726 (+ 195,8)	750	2 280 (+ 290,8)
Brésil	34	91	138	303 (+ 57)	194	438 (+ 126,6)	255	569 (+ 194,4)	332	760 (+ 293,4)
Moyen-Orient	50	122	369	978 (+ 69,7)	487	1 256 (+ 118)	610	1 557 (+ 170,2)	741	1 879 (+ 226,2)
Afrique	75	266	247	676 (+ 24,8)	341	931 (+ 72)	479	1 309 (+ 141,8)	681	1 874 (+ 246,2)
Monde	4 999	13654	9 179	22 639 (+ 12,5)	11 132	27 453 (+ 36,4)	13 167	32 728 (+ 62,6)	15 267	38 161 (+ 89,6)

* La valeur entre parenthèses correspond à la variation avec le niveau des émissions en 1990 (en %).
Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

Ces prévisions de croissance ont des conséquences importantes sur les cours des matières premières et de l'énergie. C'est ainsi que l'AIE prévoit une augmentation constante des cours du pétrole qui atteindraient 29 \$ le baril en 2030. À la fin de 2003 et en 2004, on a déjà assisté à une flambée, non prévue par l'AIE, des cours des matières premières (pétrole compris) attribuée à la très forte demande chinoise (le baril de pétrole a ainsi franchi la barre des 50 \$). Basées sur ces modèles de développement, les consommations d'énergie ainsi que les émissions de CO₂ prédites par l'AIE d'ici à 2030 sont présentées dans le tableau 2.2. Ces prédictions correspondent au modèle dit « de référence ». Nous verrons plus loin que l'AIE a développé un modèle alternatif plus favorable à l'environnement. Nous constatons qu'il existe des différences considérables de consommation d'énergie et d'émissions de CO₂ suivant les pays (tableau 2.2). Ces études prévoient des augmentations de consommations d'énergie et d'émissions de CO₂ dans toutes les zones géographiques. Le tableau fait également apparaître l'effet important de « bol d'air » résultant de la crise économique dans les pays de l'ex-bloc de l'Est (ex-URSS et pays de l'est européen). En 2000, et jusqu'à 2030, les émissions de CO₂ de ces pays étaient et seront inférieures à ce qu'elles étaient en 1990. Nous verrons plus loin que ce « bol d'air » peut jouer un rôle important pour que la zone européenne élargie respecte les objectifs du Protocole de Kyoto. Mis à part ces pays du « bol d'air », les augmentations prévues sont modérées dans certaines zones géographiques (l'Europe des 15 et l'ensemble Japon, Australie et Nouvelle-Zélande), mais importantes pour l'Amérique du Nord, et très importantes pour l'ensemble des pays en développement (PED). Le résultat de ces évolutions serait que l'ensemble Europe + Amérique du Nord, qui cumulait 78 % de la consommation énergétique en 1971, n'en représenterait plus que 48 % en 2030. Inutile de dire qu'à cette échéance les mécanismes de prise de décisions à l'échelle mondiale seront obligatoirement différents de ce qu'ils sont aujourd'hui.

Ces différentes consommations d'énergie se traduisent par des différences considérables d'émissions de CO₂ par habitant (tableaux 2.3 et 2.4) suivant les pays. Le rapport des émissions de CO₂ par habitant atteint 550 entre les États-Unis et un certain nombre de pays d'Afrique et d'Asie (Tchad, Burundi, Mali, Cambodge, Afghanistan). Si les Chinois émettaient autant de CO₂ par habitant que les Américains, ils émettraient à eux seuls 7 000 MtC-eq, soit plus de 25 000 MtCO₂, ce qui est plus que les émissions mondiales de l'an 2000. Cette remarque est essentielle pour la suite : le modèle de développement des pays

émérgents ne peut en aucun cas suivre le modèle américain en ce qui concerne les émissions de CO₂. Nous insisterons par la suite à plusieurs reprises sur la nécessité d'un transfert technologique efficace sur les procédés à faible impact sur l'effet de serre.

TABLEAU 2.3 ÉMISSIONS DE CO₂ PROVENANT DE L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DE LA PRODUCTION DE CIMENT DANS LES PAYS LES PLUS ÉMETTEURS EN 1999.

Pays	Émissions totales de CO ₂ (MtC-eq)	Émissions de CO ₂ par habitant (tC-eq)
États-Unis	1 500	5,5
Chine	771	0,61
Union européenne, dont :	685	
Allemagne	216	2,63
Royaume-Uni	147	2,46
Italie	115	2,00
France	98	1,66
Espagne	75	1,89
Pays-Bas	37	2,32
Belgique	28	2,79
Russie	392	2,69
Japon	294	2,49
Inde	293	0,3
Corée, dont :	164	2,4
Corée du Sud	107	2,29
Corée du Nord	57	2,58
Canada	120	3,93
Mexique	103	1,05
Ukraine	102	2,04
Australie	94	4,96
Afrique du Sud	91	2,12
Pologne	86	2,22
Iran	82	1,31

1tC-eq = 3,66 tCO₂-eq.

Source : CDIAAC [6].

TABLEAU 2.4 ÉMISSIONS DE CO₂ PROVENANT DE L'UTILISATION DES COMBUSTIBLES FOSSILES ET DE LA PRODUCTION DE CIMENT DANS QUELQUES PAYS PARMIS LES MOINS ÉMETTEURS EN 1999.

Pays	Émissions totales de CO ₂ (MtC-eq)	Émissions de CO ₂ par habitant (tC-eq)
Mozambique, Togo, Guinée, Bénin, Niger	0,31 à 0,36	0,02 à 0,08
Burkina Faso, Afghanistan, Cambodge, Sierra Leone, Mali, Laos	0,1 à 0,3	0,01 à 0,03
Burundi, Namibie, Tchad	0,03 à 0,07	0,0 à 0,02

Source : CDIAC [6].

En 2000, la production d'énergie est assurée très majoritairement (à 88 %) à partir de combustibles fossiles (tableau 2.5). Pour faire face aux fortes augmentations prévues de consommation énergétique, tous les combustibles fossiles sont mis à contribution. C'est ainsi que les prévisions sur les sources d'énergie primaire pour 2010, 2020 et 2030 indiquent une forte augmentation de l'utilisation du gaz naturel et une augmentation modérée du pétrole et du charbon (tableau 2.5).

TABLEAU 2.5 PRÉVISION D'ÉVOLUTION DE LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE PAR SOURCE DANS LE MONDE.

Énergie	1971		2000		2010		2020		2030	
	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%	Mtep	%
Charbon	1 449	29	2 355	26	2 702	24	3 128	24	3 606	24
Pétrole	2 450	49	3 604	39	4 272	38	5 003	38	5 769	38
Gaz	895	18	2 085	23	2 794	25	3 531	27	4 203	28
Nucléaire	29	1	674	7	753	7	719	5	703	5
Hydraulique	104	2	228	2	274	2	327	2	366	2
Autres énergies renouvelables	73	1	233	3	336	3	457	3	618	4
Total	5 346	100	9 179	100	11 131	100	13 165	100	15 265	100

Source : CEA, *Informations sur l'énergie*, 2003, d'après AIE, *Bilans énergétiques*, 2002 [4].

Nous verrons plus loin qu'il existe un seul élément positif dans l'évolution prévue : c'est la substitution partielle du gaz au charbon, ce qui permet une réduction des émissions de CO₂. Le tableau 2.2 indique toutefois nettement que l'augmentation prévue de la consommation d'énergie se traduirait par un déstockage accéléré du carbone et donc par une augmentation importante des émissions de CO₂ (+90 % par rapport à 1990). Or, dans une note d'analyse, déjà mentionnée plus haut, du rapport du GIEC, l'AIE affirme que pour atteindre une stabilisation de la concentration de CO₂ à 550 ppm, il faudrait que les émissions de CO₂ atteignent leur maximum vers 2020-2030 et redescendent pour atteindre leur niveau de 1990 entre 2030 et 2100. C'est cette évolution que nous prendrons comme objectif dans la solution alternative que nous développerons plus loin. Pour atteindre cet objectif et maîtriser l'effet de serre, il est indispensable à l'échéance 2030 de faire des efforts dans deux directions : réduction de la consommation d'énergie et émergence d'énergies renouvelables.

Face à ces prévisions d'augmentation non contrôlée de la consommation d'énergie et des émissions de CO₂, l'AIE, elle-même, propose un schéma alternatif.

2.2 LE SCHÉMA ALTERNATIF DE DÉVELOPPEMENT DE L'AIE

Le schéma prévisionnel, dit « de référence », de l'AIE s'appuie sur des hypothèses de consommation énergétique et d'émissions de CO₂ correspondant à des scénarios de continuité par rapport au passé (en intégrant, bien entendu des améliorations continues des rendements). Parallèlement, l'AIE a développé un schéma alternatif qui correspond à une rupture par rapport au passé car il tient compte des politiques de réduction des émissions annoncées dans les pays de l'Annexe B¹. Ce schéma inclut des économies d'énergie dans tous les secteurs suite au recours à des procédés plus performants (haute qualité environnementale dans l'habitat, réduction de la consommation des véhicules automobiles grâce au moteur hybride et à la pénétration des piles à combustibles, efficacité accrue des centrales de production d'électricité grâce au recours au cycle combiné et à la cogénération, etc.) et suite à l'utilisation renforcée des énergies renouvelables (hydraulique,

1. Les pays de l'Annexe B au Protocole de Kyoto sont ceux de l'Annexe A (OCDE, pays est-européens et de l'ex-URSS), moins la Biélorussie et la Turquie.

biocarburants pour les transports, énergie éolienne, énergie solaire dans l'habitat, etc.), sans oublier les changements de comportements consécutifs au renforcement de certaines infrastructures (développement des transports ferroviaires et fluviaux par exemple). Avec ce schéma alternatif, les réductions attendues des émissions de CO₂ pour les pays de l'Annexe B sont présentées dans le tableau 2.6 pour la période 2010-2030.

TABLEAU 2.6 RÉDUCTION DES ÉMISSIONS DE CO₂ PAR RAPPORT AU SCHÉMA DE RÉFÉRENCE, DANS LES PAYS DE L'ANNEXE B, SUIVANT LE SCHÉMA ALTERNATIF DE L'AIE.

	USA/ Canada			Union européenne (15)			Japon/Australie/ Nouvelle-Zélande			Total Annexe B		
	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030	2010	2020	2030
Réduction des émissions en %	1,6	8,6	14,1	4,9	12	19	3,3	8,8	14,8	2,8	9,3	15,5

Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

Grâce à cette politique de rupture, on constate une réduction conséquente (-15 %) des émissions à l'échéance 2030. Il faut noter que l'efficacité d'une politique de rupture prend du temps à montrer ses effets (plusieurs dizaines d'années). Enfin, l'Union européenne apparaît comme leader dans cette politique de réduction des émissions. C'est le résultat d'une politique incitative fortement affirmée depuis plusieurs années et notamment relayée par les maillons essentiels que constituent la recherche, le développement et la démonstration.

2.3 L'AUGMENTATION DE L'EFFET DE SERRE : MÉFAIT OU SIGNAL D'ALARME BÉNÉFIQUE ?

Nous avons déjà dit que l'effet de serre naturel est bénéfique, puisqu'il permet que la température sur terre ne soit pas de -18 °C. Est-il inéluctable que l'effet de serre dû à l'activité humaine se traduise par un échauffement de la terre ? La réponse est non : cet effet de serre additionnel se traduit par un échauffement uniquement parce que nous ne savons pas en tirer avantage (voir annexe I).

D'un certain point de vue, nous pouvons dire que nous avons de la chance que l'activité humaine, « énergivore », se traduise par une

augmentation de l'énergie disponible à la surface de la terre. On doit en effet réaliser que si cet effet de serre additionnel se traduisait par une diminution de cette énergie disponible, nous irions tout droit vers une glaciation qui serait dramatique car irréversible.

L'effet de serre allant dans le bon sens, comment se fait-il que son augmentation soit autant redoutée ? Le problème est que l'excès d'énergie associé à l'effet de serre n'est pas domestiqué. Dans ces conditions, il ne peut que se convertir en chaleur sensible, se traduisant par un échauffement, ou en énergie cinétique, se traduisant par des vents renforcés (cyclones, etc.).

L'enjeu est donc clair : il s'agit de domestiquer l'effet de serre, ce qui signifie qu'il faut impérativement que l'on utilise une partie de cet excès d'énergie *via* différents moyens comme les énergies renouvelables (biomasse, énergie solaire, énergie éolienne) que nous verrons plus en détail ultérieurement.

Depuis que l'humanité s'est engagée dans l'industrialisation, elle a utilisé en priorité les ressources fossiles, dont certaines, comme le pétrole, sont très faciles d'accès mais vont se tarir à l'horizon du siècle, ce qui est très éloigné des échelles de temps du stockage des combustibles fossiles (de l'ordre de 150 millions d'années).

La dissymétrie totale de ces échelles de temps entre stockage et déstockage des combustibles fossiles n'a pas été suffisamment prise en compte par nos sociétés industrielles. C'est une solution de facilité qui a été retenue, résultante de la loi économique de l'offre et de la demande dans laquelle la contrainte climatique liée à l'impact environnemental n'est absolument pas prise en compte. Ce point sera développé plus loin dans cet ouvrage.

Nous en sommes dans le domaine de l'énergie (exception faite de l'énergie nucléaire et des ENR¹) dans les conditions de la chasse et de la cueillette pour ce qui concerne l'alimentation, lorsque l'homme se contentait de prendre ce qui était à sa portée sans se poser la question du renouvellement de ces ressources. Où en serait l'humanité sans agriculture ni élevage ? Une démarche analogue doit maintenant être adoptée vis-à-vis de l'énergie.

Cela va certes prendre du temps. Des technologies nouvelles doivent être développées, des réglementations édictées, et c'est tout un appareil productif qui doit être repensé et élaboré sous la contrainte climatique. De fait, nous verrons plus loin que cette contrainte climatique va imposer de redéfinir un choix de société. Une telle démarche

1. ENR : énergies nouvelles et renouvelables.

est indispensable si l'on veut éviter que les prédictions apocalyptiques ne se réalisent.

Le pillage des combustibles fossiles est suicidaire à deux titres : non seulement parce qu'il provoque l'échauffement de la planète, mais surtout parce que ces ressources sont limitées et que d'ici un ou deux siècles il faudra trouver une autre solution. De ce point de vue, on peut affirmer que l'effet de serre et les craintes justifiées qu'il engendre sont un signal d'alarme très efficace pour forcer nos sociétés à se poser le problème de la stratégie énergétique en terme d'approvisionnement et d'impact environnemental.

À ce niveau, nous pouvons conclure que les besoins croissants en énergie ne pourront être que provisoirement satisfaits par les combustibles fossiles (pendant environ un ou deux siècles au grand maximum) mais qu'à cause de l'effet de serre, en tout état de cause, il est exclu de continuer à les utiliser comme nous l'avons fait jusqu'à présent car les conséquences du réchauffement de la planète vont devenir insupportables dans quelques dizaines d'années. L'effet de serre doit être perçu comme un signal d'alarme salutaire destiné à contraindre l'homme à cesser le gaspillage rapide des combustibles fossiles qui ont demandé des dizaines de millions d'années pour être générés. Nous sommes donc confrontés à un défi considérable qui exige des mesures efficaces pour être relevé.

Chapitre 3

Le climat « bien public », et l'environnement dans le droit constitutionnel

S'il est des domaines dans lesquels la mondialisation est une réalité implacable, ce sont bien le climat et l'environnement. En effet, les émissions ne connaissent pas les frontières et l'évolution climatique est le résultat d'un bilan planétaire. Plusieurs points méritent d'être soulevés à propos de la place du climat et de l'environnement dans la société.

3.1 LE CLIMAT « BIEN PUBLIC »

La prise de conscience que les frontières sont totalement inefficaces contre les catastrophes naturelles, accidents à fort impact environnemental et changements climatiques, est importante. Tous les pays sont également concernés par les émissions de tous les autres pays. Le contrôle aux frontières est inefficace en ce qui concerne ces fléaux. La solution pour maîtriser le changement climatique passe nécessairement par des accords internationaux. C'est la raison pour laquelle l'ONU dans sa convention sur le changement climatique déclare que « l'objectif ultime est la stabilisation des concentrations des gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui devrait prévenir de

dangereuses interférences anthropogéniques avec le climat ». Un tel niveau « devrait être atteint à une échelle de temps suffisante pour permettre aux écosystèmes de s'adapter naturellement au changement climatique, pour assurer que la production alimentaire n'est pas menacée et enfin pour autoriser un développement économique durable ». C'est également pourquoi l'ONU a décidé de s'unir avec l'Organisation mondiale de météorologie pour créer le GIEC, dont le rôle est de fournir aux décideurs des informations scientifiques dans le domaine du changement climatique, afin de leur permettre de prendre des décisions en connaissance de cause.

L'autre prise de conscience importante est que le climat est un « bien public » et que tout individu, groupement, entreprise, pays portant atteinte au climat pourrait être sanctionné suivant les lois ou réglementations en vigueur au même titre que tout contrevenant dans n'importe quel autre domaine.

Ces deux prises de conscience peuvent avoir, à l'horizon de quelques dizaines d'années, des conséquences imprévisibles lorsque le changement climatique aura pour certains pays des conséquences insupportables. La comptabilisation de la contribution des différents pays à l'effet de serre sera très facile à réaliser et un pays comme les États-Unis risque fort de se trouver dans une situation difficile compte tenu de ses émissions très élevées, qui ont continué de croître de 2,8 % entre 1997 et 2000, alors que celles du Canada, par exemple, ont diminué de 9,5 % pendant cette même période (figures 3.1 et 3.2).

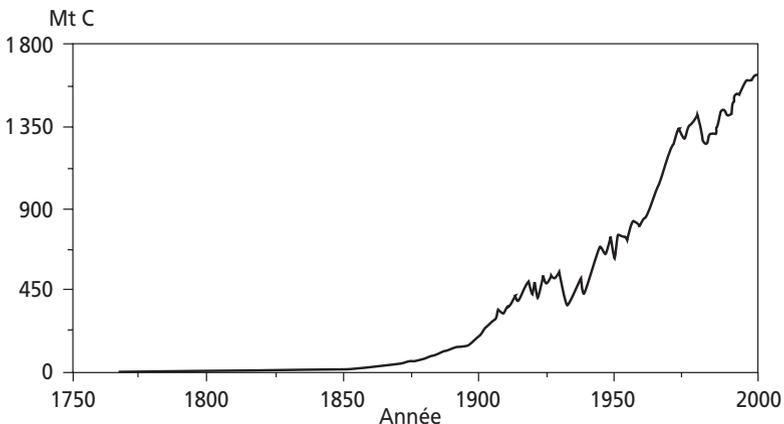


Figure 3.1 Évolution des émissions de CO₂ en Amérique du Nord, en millions de tonnes de carbone.

Source : CDIAC [6].

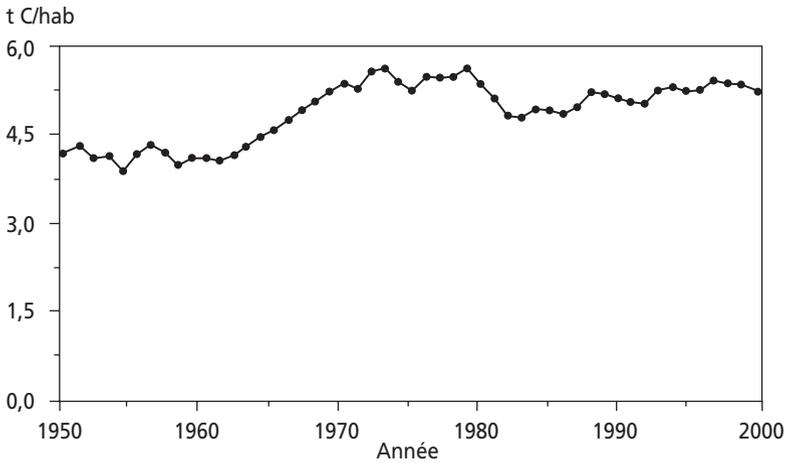


Figure 3.2 Évolution des émissions de carbone par habitant en Amérique du Nord, en tonnes de carbone par habitant.

Source : CDIAC [6].

Déjà des voix s'élèvent pour clamer que le changement climatique représente une plus grande menace que le terrorisme pour l'humanité. C'est ainsi qu'en janvier 2004, un conseiller scientifique du premier ministre britannique n'hésitait pas à déclarer dans la revue *Science* que « le changement climatique est le problème le plus grave auquel nous sommes confrontés aujourd'hui, plus sérieux même que la menace terroriste, et le gouvernement des États-Unis néglige de s'attaquer à ce défi ».

3.2 L'ENVIRONNEMENT INSCRIT DANS LA CONSTITUTION FRANÇAISE

Le fait que la Constitution française ait été modifiée en novembre 2003 pour affirmer que « le peuple français proclame solennellement son attachement aux Droits de l'homme et aux principes de la souveraineté nationale [...] ainsi qu'aux droits et devoirs définis dans la Charte de l'environnement de 2003 » constitue un pas important pour préserver l'environnement et donc le climat. Dans la Charte de l'environnement, il est dit que « toute personne doit contribuer à la réparation des dommages qu'elle cause à l'environnement, dans les conditions définies par la loi », et que « toute personne a le droit, dans les conditions et

les limites définies par la loi, d'accéder aux informations relatives à l'environnement détenues par les autorités publiques ». Bien que de nombreuses voix de juristes s'élèvent contre l'article 5 de la Charte traitant du principe de précaution, ce texte devrait être amené à jouer un rôle important dans quelques décennies lorsque le problème du réchauffement planétaire deviendra un problème de survie pour une partie de la population.

On note également une tendance très forte à ce que de plus en plus les pollueurs soient identifiés et sanctionnés financièrement. De plus, le droit à l'accès à l'information, désormais inscrit dans la Constitution française, va faciliter l'établissement de véritables débats de choix de société qui ne devraient plus se limiter à des échanges entre initiés, desquels le grand public était exclu.

3.3 LES PERMIS D'ÉMISSION

Une réponse du Protocole de Kyoto (1997), ratifié en février 2005, excepté par les États-Unis, pour maîtriser l'effet de serre a été de proposer de limiter les émissions des pays riches (ceux de l'Annexe B) de 5 % par rapport aux émissions de 1990 à l'horizon 2008-2012. Afin de donner une flexibilité à cette contrainte, les quotas nationaux d'émissions seraient échangeables. Un pays disposant d'un excédent de quotas d'émissions pourrait ainsi les céder à un pays dont les émissions dépasseraient le quota qui lui serait accordé.

À titre d'illustration, le tableau 3.1 donne les prédictions d'émissions de CO₂ telles qu'évaluées pour 2010 par l'AIE pour les pays de l'Annexe B suivant le scénario de référence ou suivant le scénario alternatif, rapportés aux objectifs du Protocole.

D'après le tableau 3.1, on constate que parmi les pays de l'Annexe B (les pays les plus riches), les émissions des États-Unis seraient très largement au-dessus de l'objectif de Kyoto alors que les émissions de la Russie et des pays d'Europe de l'Est seraient en dessous des objectifs. Le « bol d'air » apporté par les pays de l'est européen compense l'excédent d'émission des pays de l'Annexe B hors États-Unis et Canada. Dans le cas du schéma alternatif, l'objectif de Kyoto serait même légèrement dépassé pour les pays de l'Annexe B hors États-Unis et Canada.

Le Protocole de Kyoto propose de créer des permis d'émission. Ce système conduirait à fixer un prix international de la tonne équivalent de carbone rejetée dans l'atmosphère. L'Union européenne a créé un système d'échange de droits à polluer. En mars 2005, la tonne de CO₂

TABEAU 3.1 COMPARAISON DES ÉMISSIONS DE CO₂ PRÉVUES POUR LES PAYS DE L'ANNEXE B ET DES OBJECTIFS DE KYOTO EN 2010, EN MtCO₂.

	Objectif Kyoto 2010		Prédictions 2010 AIE (scénario référence)		Prédictions 2010 AIE (scénario alternatif)	
	Émissions	Écart objectif	Émissions	Écart objectif	Émissions	Écart objectif
Pays de l'OCDE de l'Annexe B	9 662	+ 2 795 (+ 28,9 %)	12 457	+ 2 795 (+ 28,9 %)	12 126	+ 2 464 (+ 25,5 %)
Russie	2 212	- 383 (- 17,3 %)	1 829	- 383 (- 17,3 %)	1 829	- 383 (- 17,3 %)
Ukraine/Est européen	1 188	- 477 (- 40,2 %)	711	- 477 (- 40,2 %)	711	- 477 (- 40,2 %)
Total	13 062	+ 1 935 (+ 14,8 %)	14 997	+ 1 935 (+ 14,8 %)	14 666	+ 1 604 (+ 12,3 %)
États-Unis/Canada	5 070	+ 1 770 (+ 34,9 %)	6 840	+ 1 770 (+ 34,9 %)	6 730	+ 1 660 (+ 32,7 %)
Total hors États-Unis	7 992	+ 165 (+ 2,1 %)	8 157	+ 165 (+ 2,1 %)	7 936	- 56 (- 0,7 %)

Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

s'échangeait à 10 € mais en juin 2005, le cours atteignait 27 €. Dans l'esprit des rédacteurs de ces textes instituant les permis d'émission, l'idée est que les plus gros émetteurs de GES ont le choix entre investir pour limiter leurs émissions ou payer s'ils dépassent leur seuil d'émission. Un exemple d'échange de crédits d'émissions est le contrat passé entre l'Allemagne et le Brésil : l'Allemagne a acheté des droits d'émission au Brésil, et en échange, elle s'est engagée à subventionner à hauteur de 500 \$ par véhicule les 100 000 premiers taxis vendus fonctionnant à l'éthanol [7]. Autre exemple, les pays du « bol d'air » (la Russie et les pays d'Europe de l'Est) auraient la possibilité de vendre aux États-Unis ou à l'Europe des 15 des permis d'émission. À terme, ces permis d'émissions constitueraient, selon les défenseurs du concept, une aide aux PED car ils permettraient aux pays riches d'acheter des permis d'émissions aux PED.

Quelle sera la portée du Protocole de Kyoto ? D'après Guesnerie [9], il réduirait de 2 ppmv la concentration de CO₂ dans l'atmosphère, soit un gain d'environ un an sur la croissance de cette concentration, ce qui n'est pas nul mais néanmoins très peu au regard du danger. On voit ici la limite de la régulation par le seul marché en comparaison d'une réduction des émissions pilotée par une politique volontariste tournée vers l'innovation technologique. C'est ce point qui sera abordé plus loin.

Le Protocole de Kyoto présente le gros avantage d'avoir porté sur la place publique le débat sur les mécanismes de contrôle des émissions de gaz à effet de serre. D'ores et déjà des idées pour une suite au Protocole, après son expiration en 2012, sont discutées. Ainsi, certaines de ces réflexions intègrent l'idée que « le coût marginal lié à la pollution des gaz à effet de serre doit être répercuté de proche en proche dans l'ensemble du système de prix, de telle sorte qu'il induise les agents à utiliser de manière économe des biens dont la production crée directement ou indirectement de la pollution. Naturellement, cet idéal définit un principe pollueur-payeur marginal » [9].

PARTIE B

DES SOLUTIONS TECHNIQUES POUR DOMESTIQUER L'EFFET DE SERRE

L'effet de serre conditionne la température de la terre mais ce n'est pas le seul facteur : le forçage négatif résultant de l'utilisation massive d'ENR pourrait permettre de compenser partiellement le forçage radiatif positif de l'effet de serre (voir annexe I). L'effet de serre est pour sa part conditionné par la teneur en GES (dioxyde de carbone et autres) et nous avons vu que celle-ci était liée d'une part à la réponse de la biosphère et d'autre part aux émissions anthropiques. C'est ainsi qu'au cours des temps géologiques, la biosphère a su, naturellement, capter une partie du carbone dans l'atmosphère et le stocker sous différentes formes (dans la végétation, dans le sol et dans les fonds marins). Enfin, depuis le début de l'ère industrielle, les besoins croissants en énergie nous amènent à déstocker de façon déraisonnable nos combustibles fossiles, ce qui se traduit par une augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre et par un réchauffement préoccupant. La constatation est que, pour l'instant, l'homme ne sait pas profiter de l'excès d'énergie que la nature lui octroie au travers de l'effet de

serre. Le défi est donc double : il s'agit d'une part de mettre à profit cet excès d'énergie pour l'utiliser, au travers des ENR, pour les besoins de l'activité humaine, et d'autre part de réguler la teneur en GES à un niveau acceptable pour la vie sur terre. Pour le relever, nous disposons de trois moyens d'action :

- la réduction des émissions de GES (notamment au travers de l'utilisation rationnelle de l'énergie) ;
- le développement d'énergies renouvelables (ENR), qui n'émettent pas de GES et créent un forçage négatif en utilisant l'excès d'énergie apporté par l'effet de serre ;
- la création de puits de GES.

Dans cette partie, nous allons présenter les solutions techniques majeures qui peuvent, dès maintenant, être mobilisées pour domestiquer l'effet de serre. Nous évoquerons un peu plus loin les mesures à prendre pour que ces procédés puissent être disséminés à grande échelle.

Chapitre 4

L'utilisation rationnelle de l'énergie

La prise de conscience de la nécessité d'une utilisation rationnelle de l'énergie date d'une trentaine d'années suite à la crise pétrolière de 1973. Cette crise a en effet entraîné une forte augmentation des cours du pétrole. Tous les pays industrialisés ont alors lancé des politiques de gestion de l'énergie. Ces initiatives ont eu des effets plus ou moins spectaculaires. C'est ainsi que pour la France, les émissions de CO₂ ont fortement chuté (d'environ 30 %) après 1973 (figures 4.1 et 4.2).

Cette chute est partiellement liée à l'introduction des premières centrales nucléaires mais elle est principalement due à une politique d'économies d'énergie. Ce sont ces efforts qu'il faut amplifier.

La consommation d'énergie étant la principale source responsable de l'effet de serre, la diminuer est le moyen le plus direct de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Parmi les grands postes d'utilisation de l'énergie primaire, il est courant d'en considérer quatre principaux :

- la production d'électricité,
- les transports,
- l'industrie,
- les autres secteurs (habitat, tertiaire, commercial, etc.).

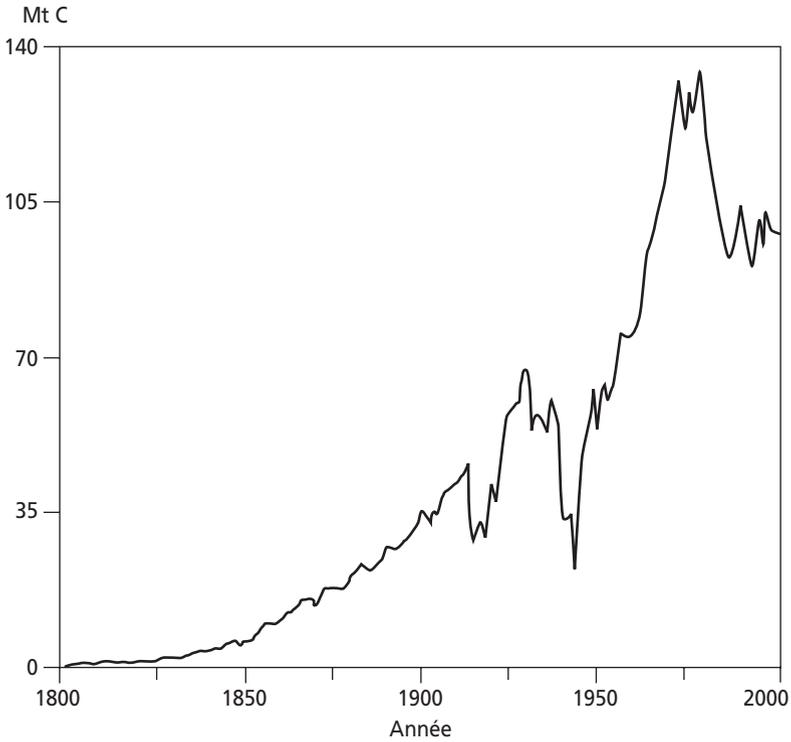


Figure 4.1 Émissions de CO₂ pour la France, en millions de tonnes de carbone.

Source : CDIAC [6].

En 2000, d'après l'AIE, la consommation totale d'énergie primaire a été de 9 179 Mtep, dont 3 636 Mtep pour la production d'électricité (tableau 4.1).

Dans le tableau 4.1, le total de la consommation globalise les consommations dans l'industrie, les transports et les autres secteurs. La génération d'électricité (troisième colonne du tableau) correspond à l'énergie primaire consommée pour produire l'électricité consommée (quatrième colonne du tableau). Le rapport entre la consommation et la génération d'électricité donne donc le rendement moyen des centrales électriques. L'électricité produite est alors consommée dans l'industrie et dans les autres secteurs, et c'est la raison pour laquelle la somme « total consommation » + « génération d'électricité » n'est pas égale à la consommation d'énergie primaire.

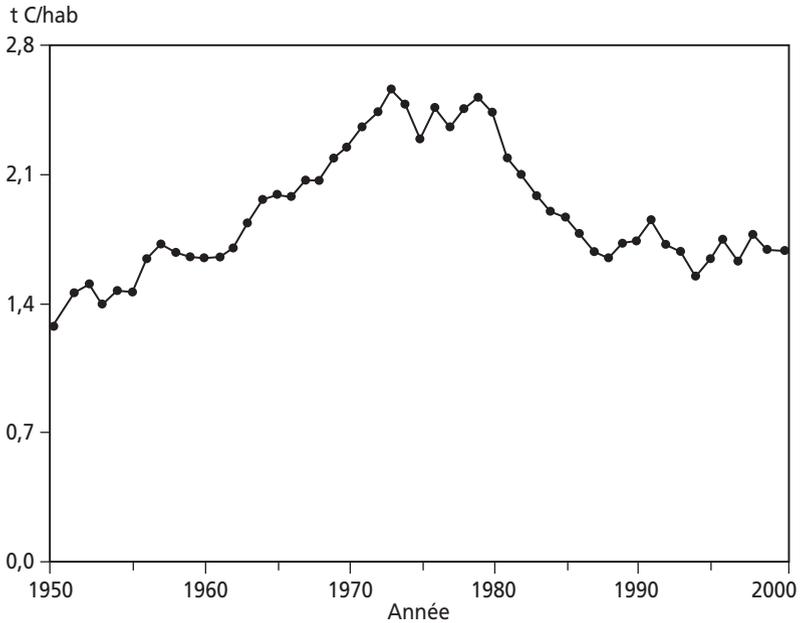


Figure 4.2 Émissions de CO₂ par habitant en France, en tonnes de carbone par habitant.

Source : CDIAC [6].

Il est intéressant de noter que la consommation d'électricité fera plus que doubler entre 2000 et 2030 alors que la consommation d'énergie primaire pour produire cette électricité n'augmentera pour sa part que de 80 % (le rendement pour la production d'électricité passera en effet de 30 % à 34 % entre 2000 et 2030). La consommation dans les transports est inférieure à celle pour l'industrie et pour les autres secteurs en 2000 alors qu'en 2030, ce sera le contraire. Le secteur transport est celui qui progresse le plus avec celui de la génération d'électricité.

4.1 LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ

À l'échelle planétaire, environ 40 % de l'énergie primaire consommée l'est pour la production d'électricité (tableau 4.1). Or, le rendement des centrales électriques en service est actuellement de l'ordre de 30 %. Cela signifie que pour une unité de chaleur utilisée sur l'énergie

TABLEAU 4.1 CONSOMMATION D'ÉNERGIE, D'ÉLECTRICITÉ ET PAR SECTEURS DE 2000 À 2030, EN MTEP.

Année	Total énergie primaire	Énergie primaire pour la génération d'électricité	Consommation d'électricité	Industrie	Transports	Autres secteurs	Total consommation
2000	9 179	3 636	1 088	2 102	1 775	1 954	6 032
2010	11 132	4 608	1 419	2 466	2 220	2 334	7 254
2020	13 167	5 559	1 812	2 862	2 749	2 762	8 636
2030	15 267	6 535	2 235	3 241	3 327	3 221	10 080

Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

primaire, on en convertit 30 % en électricité et le reste (70 %, soit plus du double) est perdu sous forme de chaleur rejetée à l'environnement (voir annexe II). D'où le difficile problème des rejets thermiques des centrales, notamment en été (ce fut un problème particulièrement délicat lors de la canicule de 2003). Cette remarque du fort rejet thermique vaut aussi bien pour les centrales électriques classiques (à combustibles fossiles) que pour les centrales électronucléaires. Nous mentionnons ici deux moyens de réduire la consommation d'énergie primaire pour la production d'électricité : la première consiste à utiliser des centrales à plus haut rendement électrique, la seconde consiste à utiliser la cogénération à haut rendement global (électricité plus chaleur).

4.1.1 Augmentation du rendement grâce au cycle combiné

Dans les turbines à vapeur couramment utilisées aussi bien pour la filière électronucléaire que dans les centrales conventionnelles, le rendement est limité à 0,3-0,35, notamment parce que la température de source dans le cycle est conditionnée par la température critique de l'eau (374 °C). Avec une turbine à gaz, il est possible de tirer meilleur profit de la haute température de la combustion d'un combustible fossile et des températures de l'ordre de 1 000 °C sont couramment utilisées. Malheureusement, le rendement d'une turbine à gaz n'est pas supérieur à celui d'une turbine à vapeur car, bien que l'on tire profit de la température élevée de la combustion, on rejette de la chaleur à haute température. Dans ces conditions, la solution est un *cycle combiné* dans lequel on couple un cycle de turbine à gaz (qui valorise la température élevée de la combustion) à un cycle de turbine à vapeur (qui utilise uniquement la chaleur rejetée par la turbine à gaz). On a ainsi un cycle à deux étages de température [15], dont la qualité réside dans celle du couplage : il faut que la chaleur rejetée par la turbine à gaz corresponde exactement (en quantité et en qualité du point de vue de la température) à la chaleur requise pour le cycle de la turbine à vapeur. Dans ces conditions, il est désormais possible, sur les nouvelles générations de centrales électriques classiques, d'obtenir des rendements de 52 % (voir annexe II).

Si la construction de toutes les nouvelles centrales et le renouvellement de toutes les centrales en fin de vie s'effectuaient en utilisant les technologies les plus récentes, pour une même consommation d'électricité, on pourrait réduire la consommation d'énergie primaire de 36 %

(soit 2 472 Mtep) pour produire les 2 235 Mtep d'électricité requis en 2030. Dans ses projections, l'AIE prévoit que le rendement moyen des centrales passera de 30 % en 2000 à 34 % en 2030. De fait, il serait possible de faire beaucoup mieux si la majorité des nouvelles centrales étaient dotées de la technologie adéquate. Le problème du transfert technologique vers les PED est ici crucial et il sera abordé à la fin de ce chapitre. Si le rendement moyen des centrales électriques était par exemple de 45 % au lieu des 34 % prévus par l'AIE, on économiserait 1 500 Mtep, soit 10 % de la consommation globale d'énergie prévue en 2030. De toute évidence, il existe ici un important gisement d'économie d'énergie. À noter que ce gisement n'existe pas pour les centrales électronucléaires dont le rendement, comme nous le verrons plus loin, n'est pas susceptible d'une forte hausse dans l'avenir à cause de limitations thermodynamiques (annexe II).

4.1.2 Augmentation du rendement grâce à la cogénération

Le second gisement important d'économie d'énergie réside dans le concept de la *cogénération*. Nous venons de voir que, pour l'instant, une quantité d'énergie supérieure au double de l'énergie électrique produite est inutilisée car rejetée dans l'atmosphère. Or les besoins en chaleur de l'industrie, du tertiaire et de l'habitat sont considérables. En 2000, ce sont 4 000 Mtep d'énergie qui ont été utilisées dans l'industrie et les autres secteurs, dont seulement 1 000 Mtep correspondaient à de l'utilisation d'électricité. Une grosse partie des 3 000 Mtep non électriques correspondait à des besoins de chaleur. Dans ces conditions, ne serait-il pas plus judicieux d'utiliser la chaleur des centrales électriques plutôt que de la rejeter ? C'est le concept de la cogénération (annexe III).

La cogénération permet de valoriser environ 80 % de l'énergie primaire utilisée dans les centrales électriques. Néanmoins, le rendement électrique des unités de cogénération est inférieur à celui de la nouvelle génération de centrales électriques à cycle combiné (de 25 à 45 % suivant la taille, contre 52 %). À noter que le concept de cogénération est peu compatible avec les très grosses centrales (de plusieurs centaines de mégawatts électriques) mais qu'il convient bien aux centrales électriques distribuées (de quelques dizaines de kilowatts électriques à quelques dizaines de mégawatts électriques). En effet, le lieu d'utilisation de la chaleur doit être proche du lieu de production de l'électricité. Des unités de cogénération sont particulièrement bien adaptées pour

des sites gros consommateurs de chaleur (usines, ensembles immobiliers, hôpitaux, etc.).

Un point essentiel pour que la cogénération soit positive pour l'environnement, est que toute la chaleur fournie soit utilisée. Une unité de cogénération doit être dimensionnée sur les besoins de chaleur et non pas sur les besoins d'électricité du site. Le plus souvent, l'électricité produite est revendue au réseau. Toutefois, il est possible de concevoir des unités de cogénération avec autoconsommation.

De cette façon, avec des unités de cogénération bien conçues, pour une utilisation globale donnée d'énergie, il est possible de réduire de façon appréciable la consommation d'énergie primaire. C'est ce que nous allons voir sur un exemple chiffré.

En 2030, l'AIE prévoit ainsi une production d'électricité de 2 235 Mtep, qui aura nécessité l'utilisation de 6 535 Mtep d'énergie primaire (soit un rendement électrique moyen de 0,34). Dans notre solution alternative, nous supposons un équipement volontariste à haut rendement tel que la moitié de l'électricité (soit 1 117,5 Mtep) soit fournie à partir d'unités de cogénération, dont le rendement global serait de 0,8 et le rendement électrique de 0,35. L'autre moitié de l'électricité serait fournie par des centrales au rendement égal en moyenne à 0,45 (par exemple, un tiers du parc serait à faible rendement (0,3) les deux autres tiers seraient à haut rendement (0,52)). Nous ne tenons pas compte dans ces valeurs moyennes de la contribution spécifique des énergies alternatives ; il serait bien entendu possible d'affiner ces estimations, mais cela ne modifierait pas la tendance des conclusions. Le tableau 4.2 présente les quantités d'énergie primaire nécessaires pour la solution AIE et pour notre solution alternative. Il donne également la production de chaleur générée par l'utilisation de la cogénération dans la solution alternative, et enfin la production totale d'énergie (électricité plus chaleur) dans les deux cas.

Avec notre scénario, la consommation d'énergie primaire diminuerait de 859 Mtep (soit 13 %), alors que la production d'énergie utile sous forme de chaleur augmenterait quant à elle de 1 437 Mtep. Cette augmentation de production d'énergie utile permettrait de réduire la consommation d'énergie dans l'habitat ou l'industrie, à condition qu'elle soit utilisée. C'est là en effet que réside tout l'enjeu de la cogénération : il faut que la chaleur disponible soit bien utilisée. Si tel était le cas, notre alternative générerait un gain net de 2 296 Mtep (859 Mtep d'économies directes et 1 437 Mtep d'économies indirectes grâce à la production de chaleur). L'amélioration des procédés de production d'électricité permettrait donc d'économiser 2 296 Mtep sur une

TABEAU 4.2 COMPARAISON DES PRODUCTIONS ET CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE (EN MTEP) POUR PRODUIRE LA MÊME QUANTITÉ D'ÉLECTRICITÉ EN 2030 SUIVANT LA PRÉVISION AIE ET NOTRE ALTERNATIVE.

	Production mondiale d'électricité en 2030		Énergie primaire pour la production d'électricité		Production utile de chaleur associée		Production totale d'énergie utile provenant de l'énergie primaire	
	Énergie	Rendement	Énergie	Rendement	Énergie	Rendement	Énergie	Rendement
Prévision AIE	2 235	0,34	6 535	0	2 235	–	2 235	0,34
Alternative	Cogénération	1 117,5	3 193	1 437	2 554,5	0,45	2 554,5	0,8
	Unités centralisées	1 117,5	2 483	0	1 117,5	–	1 117,5	0,45
Total alternative	2 235	0,39	5 676	1 437	3 672	0,25	3 672	0,65
Variation Alternative/AIE	0	–	– 859	+ 1 437	+ 1 437	–	+ 1 437	–

consommation mondiale totale d'énergie primaire de 15 267 Mtep, soit près de 15 %.

L'importance de la cogénération pour réduire les émissions de CO₂ est déjà prise en compte par les différents décideurs. C'est la raison pour laquelle l'Union européenne prévoit que 18 % de son électricité sera produite par cogénération en 2010 et l'administration américaine soutient également le procédé.

4.1.3 Réduction des émissions de CO₂ par substitution de combustible

À côté de cette réduction de consommation liée à une utilisation rationnelle de l'énergie primaire, il existe des réductions des émissions de CO₂ qui concernent l'utilisation du combustible fossile elle-même. Il est important de noter que pour une même production d'énergie primaire tous les combustibles n'émettent pas, loin s'en faut, la même quantité de CO₂. C'est ainsi que le charbon est le combustible fossile qui émet le plus de CO₂ et que le gaz naturel est celui qui en émet le moins (voir annexe IV).

TABLEAU 4.3 ÉMISSIONS DE CO₂ SUIVANT LE COMBUSTIBLE.

Combustible	Charbon	Pétrole	Gaz naturel	Bois
Émission de CO ₂ (kg CO ₂ /kWh)	0,33	0,275	0,19	0,41

L'évolution actuelle, qui tend à substituer le gaz naturel au charbon pour la production d'électricité, est très favorable pour l'environnement. Les émissions de l'Allemagne réunifiée ont ainsi baissé de 19,9 % entre 1990 et 2000, notamment grâce à l'utilisation du gaz naturel (figures 4.3 et 4.4). Par ailleurs, un effet similaire est prévu en Chine dans les années à venir.

Nous aborderons plus loin le problème des combustibles non fossiles.

4.1.4 Notre scénario alternatif pour la production d'électricité

En résumé, il est possible en 2030 d'économiser 2 296 Mtep pour la production d'électricité par rapport aux prévisions de l'AIE. La moitié de l'économie proviendrait d'unités centralisées à haut rendement (0,45 en moyenne) et l'autre moitié proviendrait d'unités de cogénération.

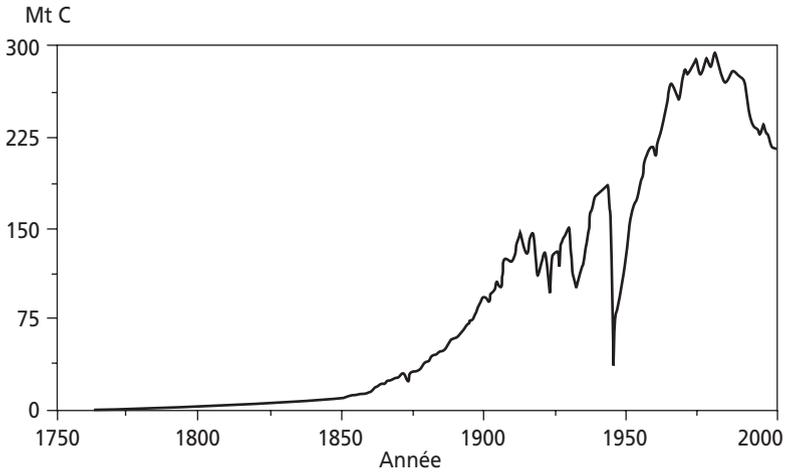


Figure 4.3 Émissions de CO₂ pour l'Allemagne, en millions de tonnes de carbone.

Source : Cdiac [6].

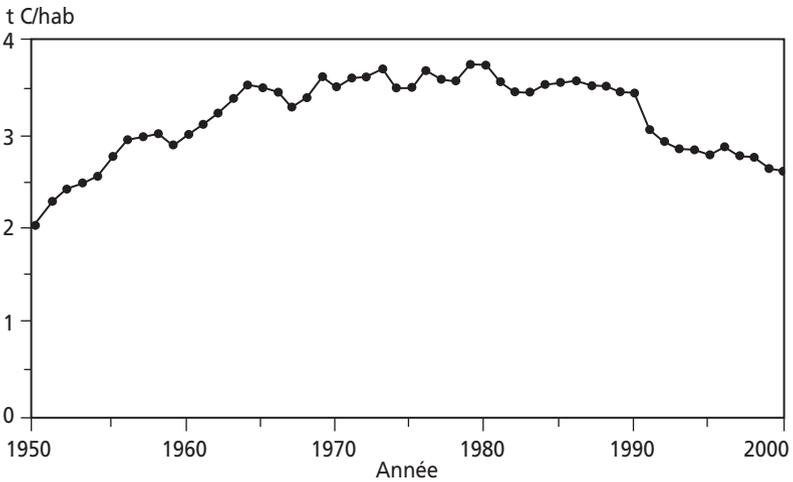


Figure 4.4 Émissions de CO₂ par habitant en Allemagne, en tonnes de carbone par habitant.

Source : Cdiac [6].

Néanmoins, pour que cet objectif ambitieux soit atteint, il est essentiel qu'un effort soit consenti par tous les pays. Or, ce sont des pays émergents qui durant cette période vont avoir à faire le plus gros effort d'équipement pour la production d'électricité. Concrètement, ce sont actuellement la Chine et l'Inde qui sont dans la démarche la plus importante d'électrification. C'est ainsi qu'entre 2000 et 2030, les consommations d'électricité en Chine et en Inde devraient, d'après l'AIE, augmenter respectivement de 220 et 84 Mtep, soit au total 304 Mtep pour ces deux pays (soit le quart de l'augmentation prévue, voir tableau 4.1). Il est donc essentiel que ces nouveaux besoins d'électricité soient satisfaits à partir de systèmes performants. Dans le tableau 4.4, nous considérons l'augmentation de la production d'électricité entre 2005 et 2030 en utilisant deux scénarios : le scénario de l'AIE et un scénario alternatif dans lequel nous supposons que toutes les nouvelles centrales construites seront des centrales (par exemple à cycle combiné) à haut rendement (0,5).

TABEAU 4.4 CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ EN CHINE ET EN INDE AVEC LE SCÉNARIO AIE ET NOTRE SCÉNARIO ALTERNATIF.

	2000 (AIE)	2005 (AIE)	2030 (AIE)	2030 (Alternative)	Économie
Consommation d'électricité (Mtep)					
Chine	93	123	323	323	
Inde	31	41	115	115	
Total	124	164	438	438	
Énergie primaire pour la consommation d'électricité (Mtep)					
Chine	360	460	1 058	860	198
Inde	145	174	385	322	63
Total	505	634	1 443	1 182	261
Rendement					
Chine	0,26	0,27	0,3	0,375	
Inde	0,21	0,235	0,3	0,36	
Total	0,24	0,26	0,3	0,37	

Source chiffres AIE : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

Nous observons que le rendement de la génération d'électricité est très faible en Chine et en Inde (0,27 et 0,21 respectivement en 2000) alors qu'il est de 0,3 au niveau mondial : il existe là une marge importante d'économie d'énergie. Entre 2005 et 2030, la Chine et l'Inde

devraient multiplier leur production d'électricité respectivement par 2,6 et 2,8. L'AIE prévoit qu'en 2030, le rendement de génération d'électricité sera de 0,3 dans ces deux pays. Faisons l'hypothèse que toute la production d'électricité supplémentaire entre 2005 et 2030 sera obtenue à partir de centrales à haut rendement de 0,5 (typiquement des centrales à cycle combiné). Dans ces conditions, les consommations d'énergie primaire seront respectivement, en Chine et en Inde, de 860 Mtep (au lieu de 1 058) et de 322 Mtep (au lieu de 385), soit une économie globale de 251 Mtep pour ces deux seuls pays. De plus, si les centrales les plus obsolètes étaient remplacées par des centrales modernes, l'économie pourrait être beaucoup plus importante : ce seul aspect représente en Chine et en Inde un potentiel pour environ 200 Mtep d'économies supplémentaires.

Cela signifie que l'effort de lutte contre l'effet de serre doit également comporter un volet sur le transfert technologique. En effet, il n'est pas possible de relever le défi de la lutte contre l'effet de serre si tous les pays n'ont pas accès aux technologies nécessaires. C'est la raison pour laquelle les instances internationales comme le GIEC doivent aborder ce problème essentiel du transfert technologique afin de permettre aux PED d'utiliser des produits performants tout en respectant les droits de propriété des industriels qui les ont développés. Nous verrons plus loin que ce poste ne doit pas être oublié dans l'évaluation du coût de la lutte contre l'effet de serre.

4.2 LES TRANSPORTS

Les transports constituent un poste important de consommation d'énergie et, de plus, c'est celui dont la progression est la plus forte. C'est la raison pour laquelle ce secteur fait l'objet de beaucoup de sollicitations pour réduire ses émissions de CO₂. Cependant, autant il a été relativement facile de proposer des solutions techniques permettant de réduire de façon conséquente la consommation d'énergie primaire dans le cas de la production d'électricité, autant pour les transports la solution ne peut pas être uniquement technique. En effet, la situation dans les PED va dépendre de la pénétration de l'automobile. C'est pourquoi des mesures d'aménagement du territoire, favorisant les transports en commun pour les individus ainsi que le ferroutage et le « merroulage » pour les camions doivent être prises. Il est certain que si la Chine et l'Inde adoptent un modèle de développement proche de celui des États-Unis, il y aura explosion de la consommation d'énergie dans les transports dans une cinquantaine d'années.

Si, comme les Américains en 2000, les Chinois consomment en 2030 6 tep/hab pour les transports, cela représentera une consommation de plus de 8 Mtep, soit l'équivalent de la consommation énergétique mondiale de 1960 ; cela apparaît dès aujourd'hui tout à fait insupportable pour l'équilibre environnemental mondial.

Regardons néanmoins ce qui, compte tenu de l'état de l'art, peut être fait techniquement pour réduire la consommation des véhicules. Pour évaluer l'impact environnemental d'une automobile, il est maintenant courant de donner la quantité de CO₂ émise au km. Il y a une dizaine d'années, les véhicules de taille moyenne émettaient couramment, près de 200 g de CO₂ au km. Une auto parcourant 15 000 km/an émettait ainsi 3 t de CO₂, ce qui est considérable. En Europe, les émissions ont d'ores et déjà été réduites à 150 g de CO₂/km et une directive prévoit de passer à 120 g de CO₂/km en 2012, c'est-à-dire qu'un véhicule européen parcourant 15 000 km/an émettra en 2012 1,8 t de CO₂/an au lieu de 3 t il y a quelques années. Le gain sera donc de 40 %.

Pour atteindre cet objectif fixé par l'Union européenne, plusieurs solutions techniques sont à l'étude comme l'amélioration de l'aérodynamique des véhicules, ou l'allègement et amélioration du rendement des moteurs.

Le *moteur hybride* (moteur thermique plus moteur électrique) est l'une des solutions envisagées. Le moteur hybride permet en effet d'éviter les phases de fonctionnement du moteur à charge partielle au cours desquelles il y a consommation inutile de carburant. Lors de ces phases à charge partielle, soit c'est le moteur électrique qui est sollicité (et dans ce cas il ne fonctionne qu'à charge partielle), soit c'est le moteur thermique qui fonctionne à charge nominale mais produit dans le même temps de l'électricité qui sera utilisée ultérieurement. Le moteur hybride permet, d'ores et déjà, de satisfaire la norme prévue pour 2012 par l'Union européenne. Des véhicules à moteur hybride sont déjà commercialisés par des constructeurs japonais et les constructeurs européens s'apprêtent à lancer leurs propres versions dans un avenir très proche.

Une autre solution serait d'utiliser un *cycle combiné*. Le cycle combiné envisagé est un cycle thermodynamique dans lequel la haute température des gaz d'échappement est utilisée pour produire, dans un second temps, du travail mécanique, et ainsi augmenter le rendement. Un tel cycle thermodynamique est conceptuellement identique au cycle combiné présenté dans l'annexe II pour la production d'électricité, mais pratiquement le cycle haute température est ici un cycle Beau de Rochas ou Diesel [15] plutôt qu'un cycle à gaz (cycle de Joule), et le cycle basse température un cycle de petite turbine à vapeur.

Autre technologie émergente, les *piles à combustible* se développent rapidement et constituent une alternative particulièrement prometteuse pour réduire les émissions de CO₂ à une échéance de vingt ou trente ans. Rappelons qu'une pile à combustible substitue une transformation électrochimique au moteur à combustion interne. Par exemple, dans une pile à combustible utilisant de l'hydrogène, de l'électricité est produite comme résultat d'une succession de transformations électrochimiques au cours desquelles s'opère un transfert d'électrons entre l'hydrogène et l'oxygène. Le résultat sera la production d'un courant électrique, d'eau et de chaleur. La production de cette même électricité en utilisant l'hydrogène dans un moteur à combustion interne aurait nécessité trois étapes : la combustion, le recours au cycle thermodynamique et l'utilisation d'un alternateur.

Mieux encore, les constructeurs automobiles travaillent actuellement sur des piles à combustible utilisant un combustible ordinaire (essence ou gaz naturel). Il est en effet possible d'effectuer une opération de « reformage » qui va produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel ou d'essence, hydrogène qui sera ensuite utilisé comme décrit plus haut. Il est en outre possible d'intégrer le reformeur dans la pile à combustible pour parvenir à un composant compact.

Tous les équipementiers automobiles développent d'importants programmes de recherches et développements sur les piles à combustibles. D'ores et déjà des flottes de véhicules sont testées et cette technologie a toutes les chances d'émerger avant 2030 (mais vraisemblablement après 2010). Toutefois, l'émergence de cette technologie étant encore incertaine et son impact environnemental étant encore difficile à chiffrer (des études d'analyse cycle de vie sont indispensables), nous avons préféré ne pas nous appuyer dessus pour présenter notre scénario alternatif. Néanmoins, il est plus que probable que les piles à combustible joueront, à l'échéance 2030, un rôle non négligeable pour l'utilisation rationnelle de l'énergie dans les transports. Il faut enfin noter que des études de développement ont également lieu pour utiliser les piles à combustible pour la production d'électricité dans des centrales au gaz naturel.

Enfin, nous verrons plus loin qu'en plus de l'amélioration des véhicules (aérodynamique, rendement...), il est également possible de prévoir l'utilisation de *biocarburants*.

Afin d'évaluer les réductions de consommation d'énergie dans les transports qui pourraient être effectuées d'ici 2030, nous présentons dans le tableau 4.5 les chiffres de l'AIE concernant les transports pour quelques pays.

TABEAU 4.5 CONSOMMATION D'ÉNERGIE DANS LES TRANSPORTS EN 2000 ET 2030 (PRÉVISION AIE ET SOLUTION ALTERNATIVE), ET ÉCONOMIES APPORTÉES PAR LA SOLUTION ALTERNATIVE.

	AIE (2000)		AIE (2030)		Alternative (2030)		Économie potentielle (2030)
	Conso (Mtep)	Par habitant (tep/hab)	Conso (Mtep)	Par habitant (tep/hab)	Conso (Mtep)	Par habitant (tep/hab)	
États-Unis/Canada	1 864	6,09	2 773	7,16	1 900	4,90	873
Europe des 15	317	0,84	448	1,22	245	0,67	203
Japon/Australie/Nouvelle-Zélande	341	2,27	437	2,91	270	1,80	167
Chine	85	0,10	286	0,19	286	0,19	
Inde	44	0,08	160	0,11	160	0,11	
Total Monde	1 775	0,29	3 327	0,40	2 084	0,19	1 243

On constate de profondes disparités de consommation énergétique pour les transports par habitant. C'est ainsi qu'en 2000, un Américain consomme près de cent fois plus qu'un Indien ! L'AIE prévoit que la consommation par habitant devrait augmenter en 2030 par rapport à 2000 dans les pays industrialisés alors que les progrès techniques permettent d'inverser cette tendance. Pour le scénario Alternative 2030, nous faisons l'hypothèse que la consommation par habitant dans les pays industrialisés aura baissé de 20 % par rapport à 2000, en nous basant sur l'utilisation de véhicules de moindre consommation (potentiellement une baisse de 40 % est possible) et l'amélioration des transports collectifs. Cette hypothèse est une hypothèse basse qui n'envisage pas par exemple la percée des piles à combustible dont la technologie n'est pas tout à fait mature aujourd'hui.

Actuellement, de nombreux pays industrialisés se préoccupent de la réduction de consommation des automobiles. C'est ainsi qu'outre l'Union européenne, le gouvernement canadien envisage de durcir les normes d'émission des gaz des voitures si les constructeurs n'acceptent pas de réduire la consommation de 25 % d'ici 2010. Dans ces conditions, il est vraisemblable que notre hypothèse de réduction de 20 % de la consommation par habitant dans les pays industrialisés sera dépassée en 2030. Ce scénario est présenté dans la colonne « Alternative (2030) » du tableau 4.5. L'économie par rapport à la simulation AIE 2030 est présentée dans la dernière colonne du tableau. Notre hypothèse ne modifie pas les prévisions de l'AIE dans les autres pays.

La consommation mondiale pour les transports est en augmentation de 7 % par rapport à 2000 mais notre alternative conduit à une économie conséquente de 1 243 Mtep en 2030, soit de 37 % par rapport aux prévisions de l'AIE. Cette économie de consommation correspond à 8 % de la consommation d'énergie primaire prédite par l'AIE.

En cumulant ces économies d'énergie avec celles de 2 296 Mtep évaluées plus haut pour la production d'électricité, on arrive à 3 539 Mtep d'économies, soit 23 % de la consommation prédite d'énergie primaire.

4.3 LES AUTRES SECTEURS (INDUSTRIE, HABITAT, TERTIAIRE, COMMERCIAL, ETC.)

Dans l'industrie, l'habitat ou le tertiaire, une partie importante de la consommation d'énergie est destinée à produire de la chaleur à basse ou moyenne température. Or, pour la production de chaleur, nous

avons déjà vu qu'il était possible de valoriser une partie de celle provenant des centrales électriques *via* la cogénération.

Une autre façon de faire des économies d'énergie primaire, pour la production de chaleur, est d'utiliser les *pompes à chaleur* (annexe V). En effet, l'utilisation d'un combustible fossile dans une chaudière ou, pire, de l'électricité (au travers d'une simple résistance électrique) sont de piètres solutions d'un point de vue thermodynamique, au contraire d'une pompe à chaleur. Pour l'instant, des pompes à chaleur électriques sont commercialisées et utilisées pour l'habitat. Le principe en est simple : c'est exactement le même que celui qu'un réfrigérateur ; à la seule différence que dans le cas d'une pompe à chaleur on utilise la chaleur produite à haute température alors que la chaleur prélevée à basse température (le froid produit dans le cas de la réfrigération) doit être fournie par une source gratuite. Cette chaleur gratuite peut provenir de l'air extérieur ou du sous-sol (on parle alors de pompe à chaleur géothermale), mais on peut également utiliser des capteurs solaires à basse température ou toute autre source de chaleur existante (par exemple l'air extrait sur une centrale de traitement d'air). Le résultat important est qu'une telle pompe à chaleur électrique permet de réduire d'un facteur 2,5 à 3 la consommation d'énergie électrique par rapport à des convecteurs. Le développement intensif de pompes à chaleur en lieu et place des convecteurs électriques permettrait de réduire de plus de moitié la consommation énergétique dans l'habitat équipé. C'est dire qu'il existe ici un gisement important d'économies d'énergie. La puissance installée de pompes à chaleur géothermales dans l'Union européenne en 2001 représentait 1 350 MWth pour une production de chaleur de 2 475 GWh (correspondant à 0,2 Mtep). Dans l'industrie, notamment agroalimentaire, des pompes à chaleur peuvent également être utilisées à plus haute température pour valoriser des rejets thermiques.

Par ailleurs, toujours dans l'habitat, l'introduction de nouvelles normes pour la conception (normes HQE, haute qualité environnementale) devrait réduire de façon importante la consommation d'énergie. Un habitat HQE induit une économie d'énergie d'environ 30 % par rapport à un habitat conventionnel construit au cours des années 1980. Il est maintenant acquis qu'en France, la consommation énergétique dans l'habitat, évaluée à environ 120 kWh/(m².an), pourrait d'ores et déjà passer à 80 kWh/(m².an) grâce à des constructions neuves et bien conçues, et pourrait être réduite à environ 40 kWh/(m².an) avant 2030. Il existe ici un gisement considérable d'énergie. Nous verrons plus loin que cette réduction de consommation d'énergie dans l'habitat y

facilitera la pénétration de l'énergie solaire (photovoltaïque pour satisfaire les besoins d'électricité et solaire thermique pour le chauffage et/ou la climatisation).

Des économies importantes d'énergie sont également possibles dans l'industrie grâce à l'amélioration des procédés et la réduction de consommation sur les postes auxiliaires (*facility management*). À titre d'exemple, nous indiquons les consignes très strictes données depuis trois ans dans une grande entreprise européenne de fabrication de composants électroniques :

- « – Énergie : réduction d'au moins 5 % par an de la consommation d'énergie rapportée au coût de production au travers de l'amélioration des procédés et du *facility management* ;
- énergies renouvelables : augmenter leur utilisation afin qu'elles atteignent au moins 5 % de la fourniture d'énergie fin 2010 ;
- énergies alternatives : utiliser autant que faire se peut les sources d'énergie alternative comme la cogénération et les piles à combustible ;
- CO₂ : réduire d'un facteur deux en 2010 (par rapport à 1990) les émissions de CO₂ ramenées au chiffre d'affaires, ce qui est cinq fois plus ambitieux que l'objectif de Kyoto. »

Ce plan de réduction de consommation et d'émissions est accompagné d'un programme d'intéressement des responsables de service.

Il faut noter qu'un tel plan répond à des impératifs de concurrence économique en prévision des évolutions réglementaires et absolument pas à un quelconque volontarisme environnemental.

L'AIE prévoit une consommation d'énergie de 6 462 Mtep en 2030 pour l'ensemble des secteurs autres que la production d'électricité et le transport. Nous avons indiqué que l'équivalent de 1 437 Mtep de chaleur pouvait être fourni par la cogénération. Ce sont donc encore 5 022 Mtep qui sont nécessaires. L'utilisation de composants comme les pompes à chaleur, conjuguée à de la HQE dans l'habitat et à des procédés économes en énergie dans l'industrie devrait permettre d'économiser 10 % de l'énergie prévue, soit 500 Mtep supplémentaires.

Au total ce sont donc 4 039 Mtep qui devraient pouvoir être économisés (2 296 pour la production d'électricité, 1 243 Mtep pour les transports et 500 Mtep pour la production de chaleur). La consommation d'énergie primaire en 2030 serait donc de 11 226 Mtep au lieu des 15 265 Mtep prévues par l'AIE, soit une réduction de 26 % par rapport à ces estimations mais néanmoins une augmentation de 23 % par rapport à 2000.

TABLEAU 4.6 CONSOMMATIONS D'ÉNERGIE PAR SOURCES SUIVANT LE SCHEMA AIE ET NOTRE ALTERNATIVE DE CONSOMMATION D'ÉNERGIE POUR 2030, EN MTEP.

Énergie	2000	2030	2030	
	AIE	AIE	Alternative 1	Alternative 2
Énergies fossiles	8 044	13 578	9 539	8 044
Énergies non fossiles, dont :	1 135	1 687	1 687	3 182
nucléaire	674	703	703	
hydraulique	228	366	366	
autres ENR	233	274	618	
Total	9 179	15 265	11 226	11 226

Dans l'alternative 1, nous supposons que les énergies non fossiles seront, en 2030, au même niveau que celui prévu par l'AIE, ce qui impose d'accroître le recours aux énergies fossiles (qui passeraient de 8 044 Mtep à 9 539 Mtep entre 2000 et 2030, soit une augmentation de 18,5 %) pour faire face à l'augmentation de la consommation globale d'énergie. Cette augmentation de consommation d'énergies fossiles est néanmoins beaucoup plus modérée dans notre alternative que dans les simulations de l'AIE qui prévoient une augmentation de 8 044 Mtep à 13 578 Mtep, soit + 66 % !

Est-il possible de limiter encore plus la consommation d'énergies fossiles en 2030 que ne le prévoit notre alternative 1 ? C'est ce que propose l'alternative 2 qui postule qu'en 2030 les énergies fossiles seront au même niveau qu'en 2000. Ceci imposerait d'augmenter le recours aux énergies non fossiles de 1 495 Mtep par rapport aux prévisions de l'AIE pour 2030 (+ 89 %), et de 2 047 Mtep par rapport à 2000 (+ 180 %). Une telle augmentation est-elle possible : est-on capable de quasiment tripler l'utilisation d'énergies non fossiles en 30 ans ? C'est ce que nous allons examiner dans le chapitre suivant.

4.4 CONCLUSION SUR L'UTILISATION RATIONNELLE DE L'ÉNERGIE

Il est possible de réduire fortement la consommation d'énergie par rapport aux projections de l'AIE. Notre analyse suppose d'utiliser les progrès technologiques (améliorations des rendements de la production d'électricité et des moteurs des véhicules), et de changer les habitudes en innovant au travers de composants matures comme la

cogénération et les pompes à chaleur. Bien entendu, rien n'exclut de faire mieux si de nouveaux composants (les piles à combustibles par exemple) émergent très rapidement.

Néanmoins, pour que cette réduction de la consommation soit effective, il est essentiel que la croissance des pays émergents s'accompagne d'un transfert technologique. En effet, que se passera-t-il si, en Chine et en Inde, les nouvelles centrales thermiques ne sont pas à haut rendement, ou si les nouvelles voitures ont une consommation élevée, ou encore si la construction de transports collectifs performants (TGV, métros notamment) n'est pas réalisée ? Le résultat serait l'augmentation non contrôlée de la consommation et l'anéantissement des efforts consentis dans les pays les plus industrialisés. Il y a là un enjeu considérable pour l'évolution climatique.

Par ailleurs, tout laisse à penser que l'utilisation rationnelle de l'énergie ne peut pas à elle seule permettre de maîtriser l'effet de serre. Notre estimation indique en effet qu'il faut que l'utilisation rationnelle de l'énergie s'accompagne d'une augmentation importante du recours à des énergies non fossiles.

Chapitre 5

Les énergies non fossiles

Nous venons de voir que les économies d'énergie auront un impact conséquent. Toutefois, elles ne permettront pas de ramener la consommation d'énergie en 2030 au niveau de 2000, et encore moins à celui de 1990. Dans ces conditions, il faudra donc avoir recours à des énergies alternatives. L'ordre de grandeur souhaité pour l'utilisation de ces nouvelles énergies est d'environ 1 500 Mtep par an en 2030. Pour l'instant deux grandes catégories de sources d'énergie peuvent satisfaire ce critère : les ENR (énergies nouvelles et renouvelables) et l'énergie nucléaire.

5.1 LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Parmi les ENR, il en existe plusieurs qui sont totalement matures pour une large dissémination même si l'appareil de production n'est pas toujours prêt à répondre à une très forte demande : la biomasse, l'énergie éolienne, l'énergie solaire (thermique et photovoltaïque), la géothermie et l'énergie hydraulique.

5.1.1 La biomasse

Le terme *biomasse* recouvre la production (naturelle ou assistée par l'homme) de matière organique résultant de la photosynthèse. Dans un

tel processus, la nature produit de la matière organique à partir de dioxyde de carbone provenant de l'atmosphère, d'eau, et grâce au rayonnement solaire. La biomasse intervient, directement ou indirectement, dans des procédés énergétiques comme sur le bilan de GES sous les formes suivantes :

- bois, taillis, etc., pour la combustion ;
- méthane, produit de la putréfaction des déchets végétaux et qui peut soit contribuer à l'émission de GES, soit être valorisé comme combustible (biogaz) ;
- cultures énergétiques (ou éventuellement certains déchets végétaux), conduisant à des biocarburants.

Le recours à la biomasse est très différent suivant que l'on considère un PED ou un pays développé. Dans un PED, le bois et ses dérivés agricoles (broussailles, taillis, etc.) constituent une source primitive d'énergie. En revanche, dans les pays les plus développés, l'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques retrouve ses lettres de noblesse à cause de l'effet de serre et relève des technologies les plus avancées.

L'utilisation de la biomasse comme source d'énergie augmente dans les pays développés et c'est une perspective particulièrement importante dans la lutte contre l'effet de serre. En effet, l'accroissement des rendements agricoles libère des terres arables qui peuvent être mobilisées soit pour la chimie verte à haute valeur ajoutée (pharmacie, cosmétiques, parfums, etc.), soit pour les cultures énergétiques, soit – ce qui est plus judicieux – pour les deux à la fois.

Deux autres arguments forts jouent en faveur du recours à la biomasse.

Le premier tient à l'évolution climatique (stabilisation de la teneur en CO₂ vraisemblablement au-dessus de 550 ppm et élévation de température au minimum de 1 à 1,5 °C) qui va entraîner une augmentation du rendement de la photosynthèse. Des expériences ont montré que certaines espèces voyaient leur rendement augmenter de 30 % pour un doublement de la teneur en CO₂. Or un niveau de 550 ppm correspond à un doublement par rapport à l'ère préindustrielle. Par ailleurs, les espèces utilisées pour les cultures énergétiques dans un climat plus chaud et à teneur double en CO₂ ne seront pas forcément les mêmes que celles utilisées aujourd'hui si bien que d'autres progrès sont à attendre des succès de la recherche dans ces domaines. Ces augmentations de rendement vont permettre d'augmenter la rotation des cultures énergétiques.

Le second argument tient au fait que l'agriculture traditionnelle entraîne des émissions de méthane résultant de la décomposition des déchets agricoles. Or le méthane est un gaz à effet de serre à fort potentiel d'échauffement de la planète (vingt-trois fois plus élevé que le CO₂). C'est ainsi que le méthane émis par l'activité humaine (essentiellement l'agriculture et les déchets urbains, qui ne cessent de croître) contribue pour 0,48 W/m² au forçage radiatif à comparer à 1,46 W/m² pour le CO₂. Bien que la concentration en méthane ne soit que de 1,75 ppm contre 360 ppm pour le CO₂ (figure 1), la contribution du méthane à l'échauffement de la planète est le tiers de la contribution du CO₂. Ce qui signifie que la lutte contre les émissions de méthane (déchets agricoles et urbains) devrait avoir une priorité à peu près égale à celle contre les émissions de CO₂, et supérieure à celle contre les émissions de fluides halogénés (dont le forçage radiatif n'est que de 0,34 W/m²), ce qui est loin d'être le cas actuellement.

a) Le biogaz

Une gestion différente de la biomasse, encore très peu utilisée, permettrait de réduire de façon considérable les émissions de méthane tout en valorisant le potentiel énergétique de ce gaz. Cette voie correspond à un enjeu considérable avec un double objectif : réduction des émissions d'un gaz à effet de serre (le méthane, dont 41 % des émissions sont d'origine agricole en Europe), et production d'un combustible renouvelable, le *biogaz*. La technique est bien connue : il faut d'abord collecter les déchets agricoles, puis leur faire subir une digestion anaérobie dans un digesteur. Le résultat est la production d'un mélange de méthane et de CO₂, appelé biogaz (typiquement 60 % de méthane, 37 % de CO₂ et des traces d'autres gaz). En fin de digestion, les résidus sont restitués au champ dont ils proviennent comme fertilisants. Le biogaz ainsi produit peut être valorisé comme combustible dans une chaudière, ou mieux, dans une unité de cogénération qui va produire de l'électricité et de la chaleur. Suivant cette procédure, on évite l'émission du méthane, gaz à fort effet de serre, on produit de l'électricité et de la chaleur, et le CO₂ qui est émis a été préalablement prélevé sur l'atmosphère : c'est un cyclage de CO₂ et non pas une émission nette. Le bilan de cette filière en termes d'effet de serre se traduit donc par une réduction des émissions de méthane plus une production de biogaz. On crée ainsi un puits de gaz à effet de serre par rapport à la solution conventionnelle car d'une part le carbone émis est recyclé, et d'autre part il est à plus faible effet de serre que le méthane qui aurait été émis sans cette opération.

Le biogaz, comme les autres combustibles (dont le bois), peut être utilement valorisé dans des unités de cogénération qui produisent de l'électricité et de la chaleur. Néanmoins, avec la cogénération, il faut être vigilant et s'assurer qu'elle est utilisée à bon escient. C'est ainsi que l'on peut montrer d'une part que le rayon de collecte des déchets agricoles ou du bois doit être faible (de l'ordre de 20 km en moyenne) et d'autre part qu'une très grosse partie de la chaleur doit être utilisée (voir annexe III) afin que le bilan environnemental de la cogénération soit positif [10]. Dans le cas contraire, la cogénération au biogaz peut être une mauvaise solution pour l'environnement. Le faible rayon de collecte implique donc que les unités de cogénération soient de moyenne puissance (de l'ordre de quelques dizaines de kWel à quelques MWel), ce qui les rend bien adaptées pour de petites villes ou de gros centres industriels.

Notons enfin que du biogaz peut également être produit à partir des décharges d'ordures ménagères ainsi que des stations d'épuration d'eau. C'est ainsi qu'actuellement un tiers du biogaz produit en Europe provient des stations d'épuration urbaines, un autre tiers provient des décharges, un quart des stations d'épuration industrielles, et le reste, soit moins de 10 % seulement, du traitement des déchets agricoles. Dans tous ces cas, les effluents gazeux doivent être correctement traités afin d'éviter les inconvénients de pollution pour les riverains. Le potentiel de l'Union européenne en biogaz a été estimé à 18 Mtep en 2020.

b) Le bois

Le bois représente la forme la plus ancienne d'utilisation de la biomasse à des fins énergétiques. En effet c'est une source d'énergie ancestrale puisque nos ancêtres l'ont utilisé spontanément comme combustible aussitôt qu'ils ont découvert le feu. Encore aujourd'hui, il existe de nombreux foyers, essentiellement dans les PED, où la biomasse est la source d'énergie pour la cuisson et le chauffage de l'habitat (tableau 5.1).

D'après l'AIE, en 2000, plus de deux milliards de personnes (soit plus de la moitié des habitants des PED) utilisaient la biomasse pour faire la cuisine et se chauffer. Dans les PED, ces chiffres baissent au fur et à mesure de l'élévation du niveau de vie. Il faut observer que l'utilisation de la biomasse participe au cycle du carbone à condition que la matière utilisée soit renouvelée. C'est ainsi que si du bois est brûlé, le carbone émis par la combustion sera réabsorbé si la forêt sur laquelle il a été prélevé est renouvelée : le bilan est alors nul pour la teneur en carbone (ou en CO₂) dans l'atmosphère. C'est pourquoi,

dans ces conditions, l'utilisation de la biomasse est bonne pour lutter contre l'effet de serre. En revanche si l'utilisation du bois se traduit par une déforestation, le carbone émis par la combustion n'est pas réabsorbé et l'utilisation de la biomasse est dans ce cas néfaste pour l'environnement. C'est la raison pour laquelle, notamment en Afrique subsaharienne, l'introduction de combustibles fossiles pour la cuisson est parfois positive pour l'environnement car cela permet de lutter contre la déforestation.

TABLEAU 5.1 NOMBRE DE PERSONNES UTILISANT LA BIOMASSE POUR LA CUISSON ET LE CHAUFFAGE EN 2000.

Pays	Nombre d'habitants utilisant la biomasse (millions)	Pourcentage de la population utilisant la biomasse
Chine	706	56
Indonésie	155	74
Reste de l'Asie de l'Est	137	37
Inde	585	58
Reste de l'Asie du Sud	128	41
Amérique latine	96	23
Afrique subsaharienne	575	89
Total PED	2 390	52

Source : AIE, *World energy outlook*, 2002 [5].

c) Les biocarburants

Les biocarburants représentent une valorisation particulièrement appréciée des cultures énergétiques. En lançant le « programme alcool » dans les années 1970, le Brésil a été le premier pays à développer un important programme de biocarburants (à partir de la canne à sucre), et c'est aujourd'hui le leader dans ce domaine. Ce programme a en effet permis à la production d'éthanol brésilienne de passer de 600 millions de litres en 1975 à 13,7 milliards de litres en 1997, ce qui constitue encore à l'heure actuelle un record mondial [7]. À la fin des années 1980, près du quart du parc automobile brésilien utilisait de l'éthanol pur avec un peu d'eau (10 milliards l/an), les autres véhicules utilisant un mélange à 22-26 % d'éthanol (4,3 milliards l/an). L'abolition du programme alcool en 1991 a ralenti l'utilisation de l'éthanol comme

carburant. C'est ainsi que le nombre de véhicules utilisant de l'alcool a culminé à 4,4 millions en 1994 pour baisser à 2,1 millions fin 2002 [7]. Ce nombre devrait augmenter à nouveau suite à la décision, en 2002, du gouvernement brésilien de réactiver les programmes alcool. Les prix de l'éthanol au Brésil sont soumis à la loi du marché et fluctuent fortement en fonction des cours de la canne à sucre. La figure 5.1 montre l'évolution comparée des prix de l'éthanol et de l'essence (avec et sans les taxes) au Brésil entre février 2000 et février 2004.

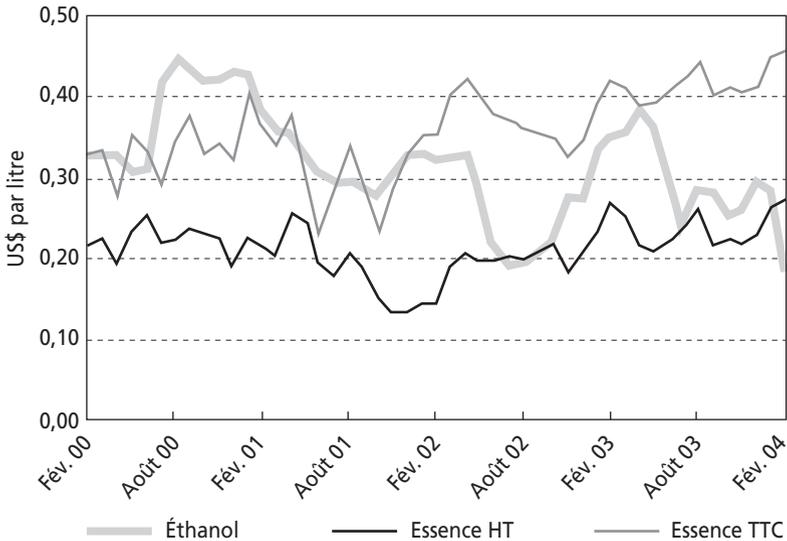


Figure 5.1 Prix de l'éthanol et de l'essence au Brésil entre février 2000 et février 2004 (en US\$ par litre équivalent d'essence).

Source : AIE, *Biofuels for transport*, 2004 [7], d'après Laydner (2003).

Durant cette période, le prix de l'éthanol a presque toujours été inférieur au prix de l'essence taxée. Au Brésil, l'éthanol est compétitif avec l'essence dès que le prix du baril de pétrole est supérieur à 25 \$. La production d'éthanol a permis au Brésil d'économiser 33 milliards de dollars d'importation de pétrole entre 1976 et 1996 et de créer 700 000 emplois dans le monde rural [7].

Derrière le Brésil, les États-Unis sont actuellement le second producteur d'éthanol (figure 5.2) et leur production est en forte croissance (avec plus de 10 milliards de litres en 2003, les États-Unis talonnent

désormais le Brésil). Alors qu'au Brésil c'est de la canne à sucre qui est utilisée pour la production d'éthanol, aux États-Unis, c'est essentiellement du blé.

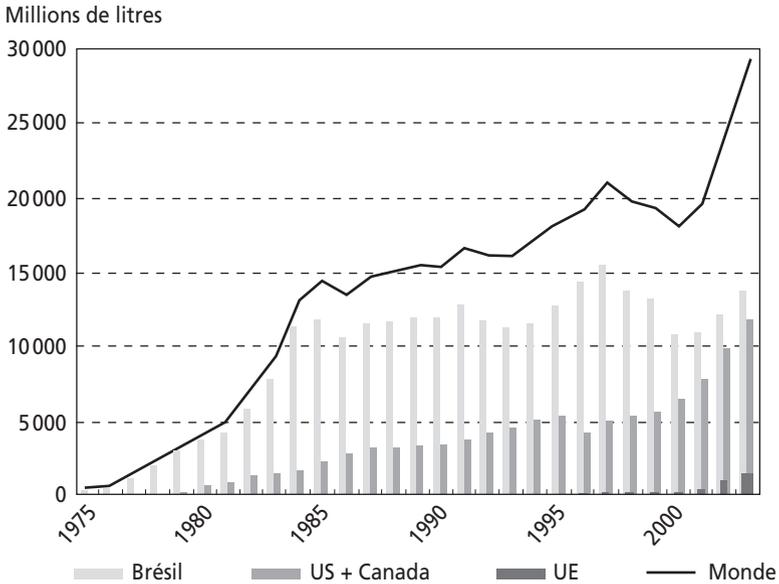


Figure 5.2 Production mondiale et par grandes régions d'éthanol (hors boissons) entre 1975 et 2003, en millions de litres par an.

Source : AIE, *Biofuels for transport*, 2004 [7], d'après Lichts (2003).

L'utilisation depuis 1980 de l'éthanol aux États-Unis a été d'abord motivée par l'augmentation de l'indice d'octane pour les essences sans plomb et maintenant l'éthanol est utilisé comme substitut au MTBE¹. Actuellement, la consommation d'éthanol dans les carburants augmente de 2,5 % par an aux États-Unis.

Derrière les États-Unis, c'est la Chine qui est le troisième producteur d'éthanol avec 3 milliards de litres par an. Le blé est principalement utilisé mais la patate douce et la canne à sucre le sont également.

1. Le MTBE (oxyde de tert-butyle et de méthyle, ou *methyl tertiary butyl ether* en anglais) a remplacé le plomb comme agent antidétonant dans l'essence à partir de la fin des années 1970.

L'Inde est également un producteur important avec 1,7 milliard de litres par an élaborés à partir de la canne à sucre. Un programme de promotion de l'éthanol comme biocarburant vient d'être mis en place en 2003 dans ce pays et devrait bientôt donner des résultats.

La production d'éthanol en Europe est beaucoup plus récente puisqu'elle n'est significative que depuis le début des années 2000 (figure 5.2). On y utilise la betterave, le blé ou le maïs pour produire de l'éthanol en additif à l'essence, alors que le colza et le tournesol servent aux biodiesels. L'objectif de l'Union européenne est d'utiliser 17 Mtep de biocarburants (soit plus de 5 % des carburants pour les transports) en 2010. Néanmoins, cet objectif sera difficile à atteindre car selon l'observatoire des énergies renouvelables Observ'er, l'Union européenne ne produisait que 1,75 Mtep de biocarburants en 2003, soit moins de 2 milliards de litres [11]. On pouvait constater par rapport à 2002 une croissance de 34 % pour le biodiesel mais une stagnation pour l'éthanol du fait de la sécheresse. Sans une forte rupture de progression, l'objectif des 17 Mtep ne sera pas atteint.

Les projections de l'AIE, qui s'appuient sur les politiques nationales motivées tant par les luttes contre l'effet de serre que pour la qualité de l'air, prévoient un quadruplement de la production mondiale d'éthanol pour les transports en 2020 (figure 5.3).

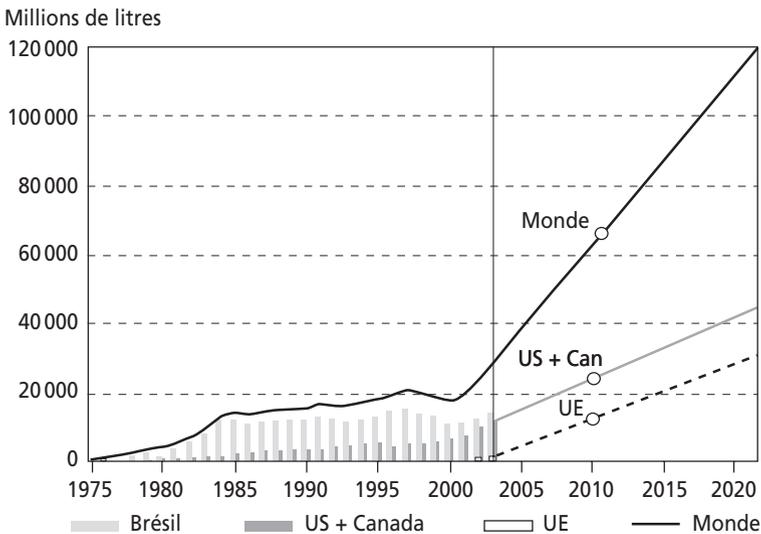


Figure 5.3 Projection de la production d'éthanol jusqu'à 2020.

Source : AIE, *Biofuels for transport*, 2004 [7].

d) Biomasse et surfaces disponibles

L'utilisation à des fins énergétiques de la biomasse est bien entendu limitée par la disponibilité des surfaces cultivables. La question de la disponibilité des terres pour ces cultures énergétiques a été étudiée. C'est ainsi que les études rapportées par l'AIE démontrent que le potentiel de production de biocarburant pourrait atteindre 18 000 milliards de litres par an, soit sept fois ce qui est actuellement consommé pour le transport routier. Si on se limite à la production de biocarburants satisfaisant à des critères de rentabilité, elle pourrait encore atteindre 6 000 milliards de litres par an en 2050, soit plus de deux fois la consommation actuelle [7]. Si de plus des véhicules économes en énergie sont massivement utilisés, il devrait donc être possible de n'utiliser que des biocarburants pour le transport routier vers les années 2030 à 2050. Pour cela, il est indispensable de défiscaliser les biocarburants et, dans un premier temps, de subventionner les cultures énergétiques. Ce serait une manière efficace de remplacer les subventions improductives attribuées à l'agriculture dans certains pays (États-Unis et Europe) par des subventions productives. Une partie de la rente énergétique serait ainsi transférée des pétroliers aux agriculteurs comme c'est le cas au Brésil depuis une trentaine d'années.

Si des terres sont disponibles et si un potentiel gigantesque existe du côté des biocarburants, la question se pose toutefois de savoir comment utiliser au mieux ces terres, et derrière cette utilisation des surfaces cultivables se profile un problème géopolitique. En effet, une guerre commerciale concernant les subventions agricoles et la libre concurrence pour les produits agricoles existe entre trois grandes entités, les États-Unis, l'Europe et les PED. Les PED accusent les États-Unis et l'Europe de pénaliser leur agriculture par l'intermédiaire des subventions et des droits de douane. Les PED ne contestent cependant pas toutes les subventions (par exemple ils acceptent les aides liées au respect de l'environnement), mais ils contestent la pratique des prix agricoles garantis qui crée une distorsion du marché. Ce problème ne pourrait-il pas être partiellement réglé si les pays les plus riches transformaient une partie de leur agriculture traditionnelle en agriculture énergétique ou, éventuellement, en agriculture à double vocation, chimie verte et énergétique ? Cela permettrait d'une part de stopper les exportations agressives à destination des PED et d'autre part d'ouvrir les importations agricoles à ces pays. Vaut-il mieux importer du pétrole et du gaz naturel, ou des céréales, du sucre, des oléagineux et des produits agricoles ayant déjà subi un processus de transformation comme des huiles, des biscuits, etc. ? C'est en effet l'une des demandes des

pays d'Amérique latine regroupés dans le Mercosur que l'Europe accepte d'ouvrir plus largement ses frontières non seulement à des produits agricoles bruts mais également à des produits agricoles transformés (dont l'éthanol). Ce serait une nouvelle distribution de la rente énergétique qui, au lieu de profiter exclusivement aux seuls lobbies pétroliers et gaziers, profiterait également aux agriculteurs (dans les PED comme dans les pays les plus développés). Néanmoins, il faut reconnaître qu'il faudra du temps pour en arriver là.

Sans aller jusqu'à ce point, la PAC (politique agricole commune) européenne intègre le changement climatique dans ses objectifs. C'est ainsi que la sylviculture et la politique de boisement des terres agricoles en fait partie intégrante, avec une incitation à une reconversion en bois et forêts des terres à faible rendement. De plus, des groupes de travail de la Commission européenne travaillent autour des thèmes de l'agriculture et des puits de carbone. Ces groupes visent notamment à mettre au point des mesures d'incitation pour le compostage et les améliorations susceptibles d'être apportées aux systèmes de digestion anaérobie pour la production de biogaz. Enfin, la réforme de 2003 de la PAC a introduit une mesure d'incitation financière, appelée « crédit-carbone », à l'adresse des agriculteurs produisant de la biomasse. Cette démarche globale de l'Union européenne devrait favoriser le développement de la filière biomasse en Europe dans les années et les décennies à venir.

Les agriculteurs français sont actuellement déstabilisés par la PAC, notamment parce que les subventions accordées à certains d'entre eux (les gros céréaliers par exemple) sont fortement contestées. Ils auraient certainement intérêt à tenir compte rapidement des nouvelles orientations positives du texte pour se tourner plus fortement vers les cultures énergétiques, notamment les biocarburants. Il s'agit certainement d'un virage important à prendre au bon moment. Ne serait-il pas plus judicieux de subventionner les cultures énergétiques pour favoriser d'une part la production de biocarburants et d'autre part le traitement des déchets afin de réduire les émissions de méthane et produire du biogaz ? Voici une mesure simple à prendre qui pourrait avoir un impact significatif sur le bilan des émissions de GES de la France.

Le développement des biocarburants est très dépendant de la fiscalité ainsi que de certaines réglementations ; c'est pourquoi des fiscalités favorables aux biocarburants doivent impérativement être adoptées. En Europe, il faudra suivre soigneusement l'impact du crédit-carbone instauré en 2003 pour voir si cette mesure est suffisante pour assurer l'émergence de la filière biocarburants. Récemment, en France, suite à

la loi de finance rectificative de 2003, l'utilisation de l'éthanol en additif pur à l'essence sans obligation de passer par l'ETBE (éthyl-butyl-éther) bénéficie de la réduction de la taxe intérieure de consommation (ex-TIPP, taxe intérieure brute sur les produits pétroliers). Une telle mesure devrait permettre aux biocarburants de se développer plus rapidement en France. Une mesure similaire de défiscalisation devrait être prise en faveur de l'huile végétale brute (HVB) utilisée comme biocarburant pour les moteurs au gasoil (essentiellement pour les tracteurs). L'utilisation des HVB permet de créer de l'emploi en milieu rural et de transférer une partie symbolique de la rente énergétique vers les agriculteurs. Il est remarquable d'observer qu'en Europe, l'Allemagne s'installe en leader des biocarburants grâce à une politique fiscale incitative et grâce à l'augmentation des quotas de production des biocarburants.

Pour conclure ce paragraphe, il faut noter que la biomasse représente d'une part un gisement énergétique potentiel prodigieux et d'autre part une perspective de puits de GES tout aussi important. Sa mobilisation demandera du temps et des réformes radicales, en premier lieu de structures dans le monde agricole, mais aussi des règles des échanges internationaux afin de favoriser les productions de combustibles là où la consommation est la plus importante. Par ailleurs, nous avons déjà mentionné que rien n'interdit qu'une espèce agricole puisse être utilisée à d'autres fins qu'énergétiques, comme c'est déjà le cas pour la canne à sucre. Beaucoup d'autres espèces pourraient ainsi être cultivées en priorité pour l'extraction de molécules à haute valeur ajoutée (chimie, cosmétiques, parfums, etc.) et leurs résidus serviraient pour la production énergétique. Pour l'instant, dans ce domaine de la biomasse, les priorités devraient être :

- reboisement dans les pays où la déforestation s'installe ;
- développement de cultures énergétiques dans tous les pays où il n'y a pas pénurie de terres agricoles (États-Unis, Europe, Brésil, etc.) ;
- gestion des déchets agricoles (et urbains) afin de réduire (voire éliminer) les émissions néfastes de méthane et de produire du biogaz.

À titre indicatif, les objectifs de l'Union européenne pour 2010 sont de 100 Mtep pour le bois-énergie, 17 Mtep pour les biocarburants et 15 Mtep pour le biogaz. Le total atteint 132 Mtep, soit 8 % de la consommation totale d'énergie primaire de 1 625 Mtep prévue par l'AIE. En 2001, selon l'Observ'er, le bois énergie restait avec 42 Mtep (44 Mtep en 2002) de loin la première valorisation de la biomasse dans l'Union européenne, devant le biogaz (2,6 Mtep) et les biocarburants (1,5 Mtep).

L'objectif des 17 Mtep de biocarburants imposerait d'utiliser, pour l'Europe des 15, une surface de 10 millions ha (ou 100 000 km²), ce qui semble raisonnable lorsque l'on considère que 5,7 millions ha étaient en jachère dans l'Europe des 15 en 2003. Le biogaz, quant à lui, n'impose pas d'utiliser de surfaces supplémentaires puisqu'il s'agit de traiter les déchets. Les récentes mesures prises en Europe devraient aider à se rapprocher des objectifs ambitieux visés pour 2010 et un renforcement ultérieur de ces mesures devrait permettre d'atteindre des objectifs encore plus ambitieux dans un avenir plus lointain.

Enfin, l'exploitation énergétique de la biomasse est un secteur où les recherches en amont doivent être fortement soutenues. Quelles espèces agricoles permettront les meilleurs rendements pour les cultures énergétiques compte tenu de l'évolution climatique attendue (doublement de la teneur en CO₂ et augmentation de plus d'un degré de la température) ? Quelles espèces permettront à la fois d'extraire des produits à haute valeur ajoutée (chimie verte) et une bonne valorisation énergétique de leurs résidus ? Le monde agricole va probablement devoir s'adapter à une mutation profonde dans un proche avenir.

5.1.2 L'énergie éolienne

De même que la biomasse, l'énergie éolienne a été utilisée depuis très longtemps par nos ancêtres pour les moulins à vent et pour pomper l'eau. Le principe est très simple : c'est l'inverse du ventilateur. Un ventilateur utilise un moteur électrique pour faire tourner des pales montées sur un rotor afin de produire un courant d'air ; l'éolienne utilise le vent pour faire tourner un rotor actionné par des pales. Cette rotation produit de l'énergie mécanique qui est ensuite transformée en énergie électrique.

La puissance P (en Watts) d'une éolienne de diamètre des pâles d (en m) et soumise à un vent de vitesse v (en m/s) est donnée par la relation $P = 0,29 d^2 v^3$ [12]. De plus, le phénomène de couche limite impose d'aller chercher le vent en hauteur (plus de 50 m du sol). L'enjeu est donc de construire des éoliennes de grande envergure et élevées, ce qui se heurte à certaines difficultés technologiques et déplaît parfois aux riverains. Pour un vent de 10 m/s et un diamètre de pale de 30 m, une éolienne fournira une puissance maximum de 0,27 MW alors qu'un diamètre de 90 m fournira 2,35 MW. Avec un vent de 15 m/s, les puissances seront respectivement de 0,9 MW et de 7,9 MW. Ces remarques sont à l'origine de l'évolution technologique de ces dernières années qui pousse vers de plus grandes structures. D'un point de vue technique, les éoliennes sont à axe horizontal et leur hauteur peut atteindre 120 m pour une puissance de 2,5 MW pour un vent de 10 m/s.

Une difficulté de gestion de l'énergie éolienne réside dans son caractère irrégulier, aggravé par le fait que les éoliennes ne peuvent pas fonctionner à fort vent (la limite est généralement de 25 m/s ou 90 km/h) ni pour un vent inférieur à 4 m/s (15 km/h). C'est la raison pour laquelle les sites favorables à l'énergie éolienne sont répertoriés : il s'agit souvent de sites localisés le long des côtes ou suivant des axes correspondant à des vents réguliers. Pour la France, les côtes depuis la Vendée jusqu'à la frontière belge ainsi que les côtes du Languedoc-Roussillon sont particulièrement propices. À l'intérieur des terres, le Nord-Ouest et le Sud-Est notamment sont également favorisés. Ailleurs en Europe, le Royaume-Uni, le Danemark, les Pays-Bas et la Belgique offrent des conditions particulièrement favorables, de même que les côtes espagnoles et grecques. Paradoxalement, l'Allemagne, où il y a le plus d'éoliennes installées en Europe, ne dispose pas des sites les plus privilégiés mais simplement de sites favorables, comme dans le Nord de la France.

L'énergie éolienne a fait d'énormes progrès depuis deux décennies, à l'initiative de la Californie qui a lancé l'industrie éolienne moderne dans les années 1980. Suite à ce démarrage tardif, le développement de cette filière a été intense et, depuis 1997, l'énergie éolienne mondiale connaît un taux de croissance annuel de 30 % (avec néanmoins un léger ralentissement en 2002) avec une production de plus de 30 000 MW. En 2001, ce sont l'Allemagne, les États-Unis et l'Espagne qui ont été à la pointe pour l'installation d'éoliennes. Actuellement, d'après l'Observ'er, l'Europe produit les trois quarts de l'énergie éolienne mondiale [11] et la puissance installée (23 000 MW en 2001) est telle que l'objectif de 40 000 MW prévus en 2010 dans le *Livre vert* de la Commission européenne [19] sera dépassé. En 2002, l'Allemagne avec 12 000 MW devançait l'Espagne (4 800 MW) et le Danemark, loin devant les autres pays. La France ne se situait qu'au dixième rang de l'Europe des 15 avec un timide 153 MW installés. À noter que suite aux décisions prises en France en 2002, l'énergie éolienne y connaît actuellement un développement important (plus de 220 MW fin 2003) mais encore sans commune mesure avec celui de l'Allemagne. En 2002, l'énergie électrique produite par l'énergie éolienne dans l'Union européenne a été de 40 TWh pour une production totale d'électricité d'environ 2 600 TWh. L'évolution actuelle et les politiques affichées amènent à prédire des productions d'énergie éolienne en Europe de 90 000 MW en 2010, 230 000 MW en 2020 et 370 000 MW en 2030. La production d'énergie électrique éolienne dans l'Union européenne atteindrait ainsi environ 450 TWh en 2020 et 650 TWh en 2030, soit

respectivement plus de 12 % et 17 % de la production électrique totale prévue par l'AIE (3 500 TWh en 2020 et 3 800 TWh en 2030). On voit donc que l'énergie éolienne présente un potentiel considérable qu'il s'agit de mobiliser avec des aides (sous forme par exemple de tarifs d'achat préférentiels de l'électricité par le réseau) judicieusement accordées. La production d'électricité éolienne pourrait alors dépasser la production d'électricité nucléaire en 2030. Néanmoins, ce décollage de l'énergie éolienne est fragile car il dépend de ces politiques de soutien et il faut insister sur la responsabilité des pouvoirs publics pour permettre à cette industrie naissante de se consolider.

Comme pour la biomasse, le potentiel de l'énergie éolienne est considérable et la contribution de l'énergie éolienne pour la maîtrise de l'effet de serre est double :

- elle permet de produire de l'énergie sans émission de GES ;
- elle contribue à réduire l'énergie cinétique libérée par l'énergie solaire (tempêtes, tornades, etc.) à la surface de la terre.

Les plus grandes perspectives de développement de l'énergie éolienne semblent être les fermes éoliennes offshore. En effet, il est possible de sélectionner des sites où le vent présente d'excellentes caractéristiques. Dans ces conditions, il serait possible d'y implanter quelques dizaines, voire plus d'une centaine, d'éoliennes par ferme, qui pourraient fournir quelques centaines de mégawatts électriques. D'ores et déjà plusieurs fermes éoliennes offshore existent : c'est ainsi que plus de 400 MW offshore sont installés au Danemark, dont plus de 150 MW sur un seul site (Nysted) ; au Royaume-Uni ce sont 60 MW qui sont déjà installés à North Hoyle et plus de 5 000 MW qui sont prévus en offshore d'ici 2010 ; l'Allemagne de son côté a accordé fin 2003 des permis de construire pour installer 600 MW offshore. La France a un programme qui, au vu de ceux précédemment cités, paraît bien timide compte tenu de son excellent gisement : un appel d'offres portant sur 500 MW offshore à installer avant la fin de 2006 a néanmoins été lancé fin 2003. Néanmoins la récente PPI (programmation pluriannuelle des investissements) française en matière d'électricité renouvelable fixe entre 500 et 1 500 MW la production d'électricité éolienne offshore pour le 1^{er} janvier 2007 (sur un total de 2 000 à 6 000 MW pour l'ensemble de la filière). D'importants projets offshore devraient voir le jour avant cette date au large des côtes françaises de la Méditerranée, de l'Atlantique, de la Manche et de la mer du Nord. Avec l'énergie éolienne offshore, il serait possible, à moyen terme, de disposer de plusieurs fermes d'éoliennes judicieusement réparties, par exemple sur la façade ouest (Atlantique, Bretagne, côtes de la Manche)

et en Languedoc-Roussillon, ce qui permettrait d'assurer partiellement l'approvisionnement électrique des villes côtières de ces régions. Une situation équivalente vaut pour l'Europe du Nord (Belgique, Pays-Bas, Danemark et Royaume-Uni) ainsi que pour l'Espagne et la Grèce.

Outre l'intérêt technique des fermes offshore dû aux vents favorables, l'implantation en mer offre un autre avantage : celui d'éviter l'hostilité des riverains. Il faut reconnaître que des populations s'opposent souvent à l'installation d'éoliennes au prétexte de certaines nuisances (paysage, bruit, étincelles, etc.). Cette résistance sera levée dès lors que la nécessité des énergies renouvelables s'imposera dans l'opinion publique, ce qui n'est pas toujours le cas. Ces résistances ne sont pas sans rappeler celles qui ont vu le jour il y a un peu plus d'un siècle avec l'apparition des chemins de fer : beaucoup de riverains affirmaient que les voies ferrées seraient dangereuses et allaient défigurer la campagne française. Ces mêmes arguments ont été utilisés avec l'électricité et les lignes de transport du courant. Ils n'étaient pas toujours infondés, mais le chemin de fer et l'électricité font désormais partie intégrante de notre environnement et de notre mode de vie. En ce qui concerne les éoliennes, des efforts d'explication et de dialogue doivent être entrepris afin que chacun puisse évaluer les conséquences de certaines décisions concernant la stratégie énergétique.

Un point important en ce qui concerne l'énergie éolienne, notamment pour son acceptabilité par les riverains, concerne le droit de bail des terrains occupés ainsi que les impôts locaux (taxe professionnelle ou autres impôts). En France, un contrat type a été signé entre le Syndicat des énergies renouvelables et des organisations agricoles prévoyant une indemnisation (droit de bail) pour l'exploitant agricole qui héberge une éolienne. L'indemnité est de 1 800 € à 2 500 € par an par mégawatt installé. Pour un parc éolien de 12 MW, cela correspond à une indemnité comprise entre 21 600 et 30 000 € par an, ce qui est significatif. De même la taxe de plusieurs dizaines de milliers d'euros (voire plus de 100 000) ira à la commune. L'énergie éolienne représentera ainsi une ressource supplémentaire pour le monde rural, qui sera en outre mieux distribuée que la manne des autres centrales électriques (thermiques conventionnelles ou nucléaires), considérable mais qui ne concerne que quelques sites.

5.1.3 L'énergie solaire thermique

La biomasse et l'énergie éolienne étaient déjà des énergies dérivées de l'énergie solaire, la biomasse directement, par l'intermédiaire de la photosynthèse, et l'énergie éolienne indirectement, puisqu'elle utilise les vents

causés par les gradients de température et de pression que génère le rayonnement solaire. Il est toutefois courant de réserver l'appellation « énergie solaire » au *solaire thermique* d'une part, et au *solaire photovoltaïque* d'autre part. Le solaire thermique connaît deux développements : le solaire à basse température pour l'eau chaude sanitaire et l'habitat, et le solaire haute température pour la production d'électricité.

a) *Le solaire thermique basse température*

Une des applications les plus répandues du solaire thermique basse température est le chauffe-eau solaire (ainsi que, plus marginalement, le chauffage des piscines). C'est une application maintenant bien maîtrisée. Le chauffe-eau solaire comporte un chauffage d'appoint (généralement électrique) et est équipé contre le gel si bien qu'il tire un profit maximum de l'énergie solaire incidente tout en satisfaisant les besoins. Son impact environnemental dépend bien entendu de l'ensoleillement. D'après l'Observ'er, en France 1 m² de capteur solaire permet d'éviter l'émission d'environ 350 kg de CO₂ par an [11]. Ce chiffre permet de situer l'intérêt et les limites de cette technologie. En Europe, le parc de capteurs solaires thermiques s'élevait à 12,8 millions de m² en 2001, soit 34 m² pour 1 000 habitants. En surface installée, l'Allemagne est de loin en tête (plus de 4 millions m²) suivie de la Grèce et de l'Autriche (3 et 2,3 millions m² respectivement), alors que la France est quatrième, mais loin derrière avec seulement 700 000 m². Par habitant, ce sont l'Autriche et la Grèce qui sont loin devant avec près de 0,3 m²/hab, la France n'étant qu'en huitième position avec seulement 0,01 m²/hab.

À raison de 350 kg de CO₂/(m².an), les 12,8 millions de m² installés en Europe, permettent d'éviter 4,5 MtCO₂, ce qui est relativement faible au vu des émissions de plus de 3 000 MtCO₂ de l'Europe des 15 en 2000. Au rythme actuel d'un million de m² installés par an, il pourrait y avoir environ 30 millions de m² de capteurs solaires en Europe en 2030 (près de 1 m² pour 10 habitants). Malgré cette valeur élevée, cela permettrait seulement d'éviter l'émission de 10 MtCO₂. Le potentiel environnemental du solaire thermique basse température est donc relativement faible et, à lui seul, il ne peut pas jouer un rôle important dans la lutte contre l'effet de serre. Néanmoins, c'est un appoint qu'il ne faut absolument pas négliger dans la mesure où il permet d'éviter le gâchis de l'utilisation d'énergie noble (électricité ou combustible fossile) pour la production de chaleur basse température.

Des politiques de subventions existent dans de nombreux pays, si bien que l'installation de chauffe-eau solaires tend à se banaliser. En

Europe, quelques pays, dont la France, connaissent un retard qu'il serait urgent de combler. Actuellement, en France, les coûts du m² de capteur solaire posé se situent entre 700 et 900 € dans l'habitat collectif, et entre 900 et 1 200 € dans l'habitat individuel [11]. Les subventions cumulées au crédit d'impôt permettent de réduire le coût de 20 à 40 %, de telle sorte que l'investissement peut être amorti en environ dix ans. Une baisse des coûts associée à l'augmentation prévue du coût de l'énergie réduirait sensiblement le temps de retour sur investissement et ouvrirait de nouvelles perspectives à cette filière.

La seconde application du solaire thermique basse température est l'habitat avec le chauffage et la climatisation. L'impact du rayonnement solaire sur les habitations (pour le chauffage en hiver comme pour le rafraîchissement en été) est à relier à l'habitat bioclimatique qui se développe sur des bases nouvelles. Tenant compte des différents apports énergétiques domestiques (solaire, occupants, équipements, etc.), il s'agit de concevoir cet habitat (exposition, ouvertures, etc.) de telle sorte que la consommation énergétique (chauffage, éclairage, rafraîchissement, etc.) soit minimale tout en respectant les normes d'hygiène et de confort. Dans ce contexte, les apports solaires directs sont pris en compte mais ils peuvent également être amplifiés grâce à l'utilisation de surfaces du bâtiment équipées de capteurs solaires. Cette captation de l'énergie solaire peut s'effectuer à partir de capteurs solaires thermiques comme de capteurs solaires photovoltaïques (5.1.4).

Les capteurs solaires thermiques peuvent être intégrés dans la toiture (des géométries innovantes comme les tuiles solaires sont développées), reposer simplement sur le toit, ou encore être déportés. Ils peuvent aussi bien fournir de l'eau chaude que de l'air chaud. L'eau chaude fournie peut alors alimenter des planchers chauffants (généralement de l'eau vers 35 °C) ou bien des ventilo-convecteurs (eau à 45 °C environ). Pour l'eau chaude sanitaire (ECS), c'est généralement de l'eau vers 60-70 °C qui est recherchée. Lorsque l'on utilise des capteurs solaires dans de l'habitat ancien dans lesquels des radiateurs en fonte sont installés, il peut être nécessaire d'utiliser de l'eau vers 60-65 °C car généralement les surfaces de radiation ont été sous-dimensionnées. Il faut noter que plusieurs technologies de capteurs solaires à eau existent. Les plus simples consistent en une plaque solaire plane peinte en noir sur une face, parcourue par un serpent, l'ensemble étant placé dans un boîtier au fond isolé et recouvert d'un couvercle transparent. Des modèles plus sophistiqués comportent des tubes sous vide, ce qui permet d'obtenir des températures d'eau chaude (ou de vapeur) nettement plus élevées (90 °C à 130 °C). À noter pour conclure que la

réduction de la consommation énergétique dans l'habitat grâce aux normes HQE permettra de réduire les surfaces de capteurs nécessaires, et facilitera de fait la pénétration du solaire dans ce secteur.

Un point plus original, et un peu plus délicat, concerne le défi du rafraîchissement *via* l'énergie solaire. Dans de nombreuses régions, il existe des besoins de rafraîchissement pendant au moins quelques jours par an en été. La canicule de l'été 2003, avec ses 15 000 décès en France (estimation de l'Insee), est là pour en attester : le rafraîchissement en été n'est pas toujours un luxe, ce peut être une condition de survie pour certaines populations à risques (voir annexe VI). Le rafraîchissement par l'énergie solaire est possible. Tout d'abord, notons qu'un habitat bioclimatique bien conçu peut généralement se passer de système de climatisation active. Par ailleurs, les capteurs pour chauffe-eau solaires peuvent être utilisés pour faire fonctionner un groupe refroidisseur de liquide à sorption, capable de fournir de l'eau fraîche (on parle d'eau « glacée » même lorsqu'elle est à une température de 7 °C, voire de 15 °C) pourvu que la température de la chaleur fournie soit d'au moins 70 °C [13]. Cette eau glacée est alors distribuée, suivant la technologie retenue, soit dans le plancher (ou plafond) rafraîchissant (de l'eau à 15 °C est alors distribuée) soit dans des radiateurs (de l'eau à 7 °C est généralement utilisée). Pour l'instant, peu de systèmes de climatisation solaire sont utilisés dans l'habitat mais c'est une application appelée à se développer car elle permet de valoriser les capteurs solaires en été.

b) Le solaire thermique haute température (ou thermodynamique solaire)

Dans ce cas, il s'agit d'utiliser l'énergie solaire pour fournir de la chaleur à haute température, et ensuite d'exploiter cette chaleur pour faire fonctionner un cycle thermodynamique la transformant en électricité. De telles centrales solaires existent (majoritairement aux États-Unis) avec différentes technologies de captation de l'énergie solaire et différents cycles thermodynamiques.

Les filières se différencient par le système de concentration de l'énergie solaire ainsi que par le système thermodynamique utilisé. Il existe trois types de concentration solaire :

- à *miroir parabolique de révolution* (qui suit le soleil). Son diamètre est généralement de l'ordre de 10 m. Le rayonnement solaire direct est réfléchi par le miroir et concentré sur un collecteur placé au foyer de la parabole. Un fluide caloporteur (un sel fondu pour une température inférieure à 500 °C ou du sodium fondu pour une température supérieure à 500 °C) circule dans ce collecteur et transfère

la chaleur haute température à un système thermodynamique. Compte tenu de la haute concentration du rayonnement solaire, la température du fluide dans le collecteur atteint 700, voire 800 °C, ce qui permet de faire fonctionner un cycle de Joule, un cycle de Stirling ou mieux un cycle combiné [15]. Le rendement d'un tel système, défini comme le rapport entre l'énergie électrique produite et l'énergie solaire incidente, peut dépasser 20 %. Compte tenu de la taille du miroir, la puissance électrique délivrée par un miroir est comprise entre 10 et 20 kW_{el}. La centrale de Warner Springs en Californie, installée en 1983 et qui n'est plus utilisée aujourd'hui, fonctionnait suivant ce principe et était constituée de plus de 700 capteurs de 20 m de diamètre pour une puissance de 15 MW_{el} ;

- à *miroirs cylindro-paraboliques*. Au foyer commun de ces miroirs est placé un tube en verre sous vide, au centre duquel se trouve un tube métallique dans lequel circule un fluide caloporteur. La température atteinte est moins élevée que dans le cas précédent (de 200 à 350 °C) car la concentration du rayonnement solaire est plus faible. Le système thermodynamique utilisé dans ce cas est une turbine à vapeur. Le rendement est plus faible que dans le cas précédent puisqu'il est compris entre 10 et 15 %. De tels systèmes sont bien adaptés pour des puissances de quelques à quelques dizaines de mégawatts électriques. Plusieurs sites fonctionnant avec ce système existent aux États-Unis : les centrales solaires du désert de Mojave près de Los Angeles, construites entre 1984 et 1990 fournissent ainsi une puissance totale de 350 MW_{el} grâce à une surface de captation solaire de 480 000 m² (0,48 km²). Certaines de ces centrales solaires présentent l'originalité d'être hybrides solaire-gaz. Elles utilisent en effet du gaz naturel (à concurrence de 25 % de l'énergie primaire) en complément de l'énergie solaire. Dotées, de plus, d'un stockage thermique, certaines de ces centrales peuvent fournir de l'électricité 50 % du temps pendant l'année. Bien que la société Luz qui a construit ces centrales ait fait faillite, la relève est assurée et plusieurs projets importants utilisant cette technologie devraient voir le jour très prochainement [11] ;
- à *tour solaire*. La France a été précurseur pour cette filière au travers de la centrale Thémis (construite dans les Pyrénées au début des années 1980) qui a été un succès technique mais un échec économique. Des miroirs orientables, appelés héliostats, suivent le soleil et en réfléchissent le rayonnement vers une tour. Au sommet de celle-ci se trouve le collecteur dans lequel il est possible de porter le fluide caloporteur à des températures très élevées. Si le fluide

est un sel fondu, la température est limitée à moins de 500 °C mais si c'est un gaz (de l'air par exemple), la température peut atteindre 800 °C. Le système thermodynamique utilisé ensuite est généralement une turbine à vapeur (ou à gaz) mais pourrait être un cycle combiné. Cette dernière filière est adaptée pour de fortes puissances de plusieurs dizaines de MW_{el}. Le rendement est compris entre 10 et 15 % mais devrait pouvoir atteindre 20 %.

Ces trois filières sont prêtes pour que soient engagés des programmes ambitieux d'industrialisation, avec l'objectif qu'un développement du marché permette d'abaisser les coûts. C'est ainsi que d'importants projets, soutenus par l'Union européenne et visant à installer 2 000 MW_{el} d'ici 2015, existent en Espagne, et plus précisément en Andalousie : le projet Andasol de 50 MW (pour une surface de 510 000 m²) utilise des capteurs cylindro-paraboliques, le projet Solar Tres, de 17 MW, est basé sur une centrale à tour comprenant 2 750 héliostats pour une surface de captation de 264 000 m², tandis que deux autres projets, l'un de centrale à tour et l'autre de capteurs cylindro-paraboliques, sont bien avancés. L'Italie étudie également plusieurs projets de centrales solaires, dont un projet de 12 MW avec 55 000 m² de miroirs cylindro-paraboliques dans les Pouilles. L'Afrique du Nord est également une zone très favorable : le Maroc devrait construire une centrale mixte solaire-gaz à cycle combiné de plus de 200 MW (la partie solaire comporterait 220 000 m² de capteurs cylindro-paraboliques pour une puissance de 35 à 40 MW), et l'Italie considère même la possibilité d'installer des centrales solaires en Tunisie et de transporter l'électricité sous la mer [11]. L'Afrique du Sud pour sa part étudie un projet de centrale à tour qui comprendrait environ 5 000 héliostats de 140 m² répartis sur un terrain de quelques km² pour une production de 15 MW. Les États-Unis enfin ne sont pas en reste puisqu'ils s'emploient à relancer une filière solaire thermodynamique quelque peu abandonnée pendant les décennies de l'énergie bon marché. C'est ainsi qu'un projet très avancé existe au Nevada d'une centrale de 50 MW à partir de capteurs cylindro-paraboliques. D'après la revue *Systèmes Solaires*, ce sont plus de 500 MW de projets dans le solaire thermique que l'on pouvait considérer comme très avancés en 2004 [11].

Le potentiel du solaire est en tout cas indéniable. D'après l'OPESCT¹ [14], une centrale à tour de 100 MW basée sur des miroirs de 25 m de

1. L'OPESCT (Office parlementaire des choix scientifiques et techniques) est une instance parlementaire chargée « d'informer le Parlement des conséquences des choix de caractère scientifique et technologique, afin, notamment, d'éclairer ses décisions ».

côté nécessiterait un champ solaire de 4 km de rayon et la superficie des déserts à proximité de zones peuplées est très largement suffisante pour assurer la production électrique dont a besoin notre planète. Il suffirait ainsi d'une superficie de 250 000 km², soit moins de 2 % de la surface totale des déserts de la terre, pour produire toute l'énergie électrique consommée actuellement dans le monde. À titre indicatif, le désert de Mojave en Californie représente 65 000 km², et le désert algérien dépasse les 2 millions de km² ! Ce n'est donc pas la surface de captation de l'énergie solaire qui fait défaut. Lorsque les champs de capteurs solaires ne sont pas installés dans des déserts mais dans des zones cultivables, il est intéressant de noter qu'à l'ombre de ces capteurs solaires, des prairies ou d'autres cultures peuvent être exploitées. Ces filières connaîtront vraisemblablement un avenir brillant si la pénurie d'énergie ou l'effet de serre devenaient des menaces à court terme. Néanmoins, leur contribution pour réduire l'effet de serre d'ici 2030 sera certainement faible ; en revanche, à une échéance plus lointaine, elles ont de fortes chances de s'imposer.

De fait, les freins à la dissémination de ces filières sont moins techniques qu'économiques. Au coût actuel de l'énergie, ces filières ne sont pas compétitives sans les aides dont elles ont besoin pour émerger. En 2002, la production d'électricité solaire due aux centrales thermodynamiques a atteint 864 GWh en Californie ce qui représentait seulement 0,3 % de la production totale d'électricité. Or l'évaluation des coûts de production de l'électricité solaire suivant les différentes filières en Californie (tableau 5.2) fait apparaître que le solaire thermodynamique se situe nettement au-dessus du cycle combiné au gaz naturel mais au même niveau que les cycles de secours utilisés aux heures de pointe, qui correspondent justement aux fortes demandes en climatisation aux heures de plein soleil.

TABLEAU 5.2 COÛTS DE PRODUCTION EN 2002 DE L'ÉLECTRICITÉ EN CALIFORNIE SUIVANT LES FILIÈRES, EN C\$/KWH.

Filière	Coût
Cycle combiné au gaz naturel (base)	5,2
Cycle au gaz naturel de secours en heures pleines	15,7
Hydroélectrique	6
Éolien	4,9
Solaire thermodynamique	13,5 à 17,5
Solaire photovoltaïque	43

Source : California energy commission (www.energy.ca.gov/electricity).

Le solaire thermodynamique se doit donc de réduire ses coûts d'un facteur trois dans les vingt ans pour devenir compétitif avec le cycle combiné de base mais il est d'ores et déjà compétitif avec l'électricité aux heures de pointe. Le défi serait d'autant plus facile à relever si une écotaxe était appliquée au gaz naturel et un crédit-carbone accordé au solaire thermodynamique.

Les aspects économiques des coûts garantis et des crédits constituent, pour cette filière comme pour toutes celles de l'électricité renouvelable, un facteur de développement déterminant et permettent de comprendre les variations du nombre de projets. C'est ainsi que les centrales solaires aux États-Unis ont profité, dans les années 1980, de crédits d'impôts et de prix d'achats de l'électricité garantis par les sociétés distributrices. Mais en 1990, la réduction des crédits d'impôts et des prix d'achats garantis ont stoppé net ces développements en Californie. En revanche, en Espagne, le décret de 2004 fixant le prix d'achat du kWh solaire thermodynamique à 0,21 € pendant vingt-cinq ans (soit trois fois le prix moyen de l'électricité) explique l'engouement des industriels à pouvoir profiter de ces tarifs, et donc les projets que nous avons évoqués. En effet, le décret limite ce privilège à 200 MW installés avant 2006. De même, le redémarrage du solaire thermodynamique dans l'Ouest des États-Unis est lié à des directives qui fixent des objectifs de quotas obligatoires d'énergie renouvelable (par exemple, au Nevada, les distributeurs d'électricité doivent accroître de 2 % tous les trois ans la part d'électricité renouvelable dans leur approvisionnement).

5.1.4 L'énergie solaire photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en énergie électrique. Elles utilisent le phénomène physique de la photo électricité : absorption d'un photon par un matériau semi-conducteur puis émission au sein de ce matériau d'une charge électrique transformée en courant électrique dans un circuit utilisateur. De tels systèmes ont été développés depuis plusieurs dizaines d'années et plusieurs technologies sont actuellement commercialisées. Leur coût, encore élevé, limitait jusqu'à très récemment leurs applications à des systèmes de très faible puissance (alimentation électrique miniaturisée de montres, etc.) ou à l'alimentation électrique des sites isolés ou de raccordement difficile au réseau (phares et balises par exemple). Depuis quelques années cependant, avec l'apparition de politiques volontaristes de développement des énergies renouvelables, et notamment de l'électricité, le photovoltaïque connaît un développement significatif dans l'habitat. L'exemple allemand est à cet égard particulièrement

intéressant. Le programme de 100 000 toits solaires lancé le 1^{er} janvier 1999 ambitionne l'installation d'unités de 3 kW_{el} avec un financement à 100 % de l'investissement par un prêt bancaire à un taux inférieur à ceux du marché, un délai de deux ans pour le premier remboursement et surtout un tarif intéressant de rachat de l'électricité (0,50 €) pendant vingt ans.

Dans ce contexte, il faut noter que la politique française est frileuse. La PPI française, déjà mentionnée plus haut à propos de l'énergie éolienne, fixe de 1 et 50 MW le mécanisme d'obligation de rachat par EDF de l'électricité photovoltaïque entre le 1^{er} janvier 2003 et le 1^{er} janvier 2007, ce qui devrait permettre à la France de combler une petite partie de son retard dans ce domaine. Les acteurs de la filière photovoltaïque française demandent aux pouvoirs publics de promouvoir un programme, s'inspirant du plan allemand, de 15 000 toits solaires pour permettre le décollage du photovoltaïque en France.

À l'heure actuelle, c'est la filière du silicium cristallin qui domine à 80 % le marché, le reste étant largement occupé par le silicium polycristallin et amorphe. Les rendements de conversion de l'énergie solaire sont encore faibles : ceux des panneaux solaires de silicium cristallin sont environ de 10 à 15 % alors que ceux des petits panneaux de laboratoire peuvent dépasser 25 %. C'est dire qu'il existe une marge de progression pour cette technologie. Ce rendement est à rapprocher des rendements annoncés pour le solaire thermodynamique : on constate qu'ils sont du même ordre de grandeur, avec un avantage pour le photovoltaïque qui peut utiliser le rayonnement diffus tout autant que le rayonnement direct, ce qui n'est pas le cas des capteurs à concentration. Les coûts de production du kilowattheure pour les sites raccordés au réseau sont encore élevés mais ils sont déjà compétitifs pour les sites indépendants. Il est intéressant de noter que les coûts de production baissent régulièrement depuis les années 1980. Si la demande croît et si les procédés de production des photopiles progressent, il est vraisemblable que dans quelques années le coût du kilowattheure deviendra compétitif même pour les sites raccordés au réseau. L'objectif immédiat est donc de maintenir le développement de cette filière et, à cette fin, il est essentiel de prendre, au niveau des institutions tarifaires nationales des énergies, des mesures d'incitation. Des recherches sur d'autres filières visent par ailleurs à réduire le coût des matériaux (la préparation du silicium, quel qu'il soit, est en effet onéreuse).

D'après l'Observ'ér [11], la puissance photovoltaïque installée en Europe en 2003 s'élevait à 562 MWc (l'unité est le mégawatt-crête, voir annexe VII), dont 478 MWc raccordés au réseau électrique.

L'Allemagne est de loin en tête avec 397 MWc, alors que la France est cinquième avec seulement 22 MWc, dont seulement 4,5 MWc raccordés au réseau. Ce faible niveau de raccordement illustre la difficulté, en France, du rachat de l'électricité, particulièrement en comparaison avec l'Allemagne où les conditions sont plus favorables. Le prix de rachat en France était en effet fixé à 0,1525 € contre 0,50 € en Allemagne. Ces conditions pénalisent fortement le développement du photovoltaïque en France. On note également que, bien que les conditions d'ensoleillement y soient favorables, l'effort en faveur du photovoltaïque est faible dans les pays du Sud de l'Europe (Italie, Espagne, Grèce et Portugal) puisque ces quatre pays ne totalisaient que 58 MWc contre 397 pour la seule Allemagne ! Il existe indéniablement dans ces pays un fort potentiel de développement. L'objectif de l'Europe serait d'atteindre 3 000 MWc à la fin de 2010. Cet objectif sera difficile à atteindre si l'Allemagne est le seul pays à faire des efforts. Si cet objectif était atteint, cela correspondrait à une production annuelle d'électricité d'environ 3 TWh à comparer à une production électrique prévue de 2 600 TWh. À l'échelle mondiale, la production de photopiles en 2003 s'élève à 763 MWc et le Japon est le premier producteur (365 MWc), suivi par l'Allemagne (115 MWc) et les États-Unis (109 MWc).

Force est de constater que l'impact à court terme du photovoltaïque sera faible, près de cent fois inférieur à celui de l'énergie éolienne. Alors que l'éolien et la biomasse peuvent produire dans un avenir très proche de l'électricité renouvelable en quantité notable, ce n'est pas le cas du photovoltaïque, qui, comme le solaire thermodynamique, ne comptera effectivement dans les bilans qu'au-delà de 2030. Les acteurs les plus enthousiastes de la filière estiment que ce n'est qu'à partir de 2050 que le photovoltaïque pourrait jouer un rôle important dans le bouquet énergétique des pays les plus avancés sur cette technologie. Ils estiment ainsi que le photovoltaïque devrait alors pouvoir fournir 20 à 35 % de l'électricité de ces pays. L'objectif du Japon, premier producteur actuel, est d'atteindre 4,8 GWc installés en 2010 (soit environ 5 TWh pour une production totale d'électricité prévue de l'ordre de 1 000 TWh, ce qui est encore très marginal).

Remarquons que les politiques volontaristes du Japon et de l'Allemagne soutiennent fortement leurs industries nationales dans ce domaine. C'est ainsi que le japonais Sharp est leader mondial avec près de 200 kWc vendus en 2003, et qu'avec un taux de croissance annuel de 25 % il espère atteindre rapidement une production annuelle supérieure à 500 kWc, ce qui lui permettrait de réduire fortement le coût

des cellules photovoltaïque et donc d'offrir des perspectives tout à fait nouvelles à ce secteur. À l'inverse, les pays qui n'ont pas de politique de développement du photovoltaïque pénalisent fortement leurs industries locales. C'est le cas en France pour Photowatt, qui, bien que pionnier en la matière, ne se trouve aujourd'hui qu'au onzième rang mondial et risque d'être réduit au rang de figurant.

Pour le moyen terme, un des gros avantages de l'énergie solaire photovoltaïque est qu'elle peut s'intégrer à l'habitat. On pourrait atteindre des situations où, pour l'habitat individuel ou le petit collectif, une grande partie de l'énergie électrique serait fournie par les panneaux solaires photovoltaïques. Pour le grand habitat collectif, la situation est moins favorable car la surface utilisable par habitant est plus faible mais l'utilisation de certaines façades est envisagée. Néanmoins, la situation peut radicalement changer avec l'habitat du futur très économe en énergie (environ 50 kWh/m² par an), dont la moitié pour l'électricité. En effet, avec une énergie solaire disponible d'environ 1 200 kWh/m² par an et des cellules photovoltaïques d'un rendement de 10 %, on obtient 120 kWh_{el}/m² par an ; il suffirait donc d'environ 0,2 m² pour satisfaire les 25 kWh_{el}/m² par an nécessaires. Ainsi, un immeuble de cinq étages dont tout le toit serait occupé par des panneaux solaires photovoltaïques pourrait être à peu près autonome en électricité (à condition, bien entendu de posséder un moyen de la stocker). L'habitat de demain économe en énergie est par conséquent tout à fait compatible avec le photovoltaïque.

Dans cette perspective d'intégration à l'habitat, une possibilité intéressante est offerte par les panneaux solaires équipés non seulement de cellules voltaïques mais aussi de systèmes de chauffage de l'eau. En effet, le rendement des panneaux solaires photovoltaïques est faible, de l'ordre de 15 %, c'est-à-dire dire que 85 % de l'énergie solaire est perdue sous forme de chaleur. Ainsi, sur 800 W/m², avec des capteurs solaires présentant les deux fonctions (photovoltaïque et thermique), on récupère une puissance électrique de 120 W/m² et une puissance thermique de 520 W/m². De tels composants fournissent à la fois l'électricité et l'eau chaude sanitaire.

Cette intégration du solaire à l'habitat pourrait constituer un moyen de lutte efficace contre les canicules dans les villes les plus exposées. En effet l'utilisation intensive de surfaces pour capter l'énergie solaire permet d'une part d'éviter les montées excessives de température et d'autre part de produire une partie de l'énergie nécessaire pour assurer la climatisation des locaux. Si cette climatisation était judicieusement gérée, c'est-à-dire si la chaleur rejetée par les climatiseurs était transférée

dans le sol ou dans des rivières au lieu d'être rejetée dans l'atmosphère, cela permettrait de plus de rafraîchir l'environnement. Grâce à une bonne gestion de l'énergie solaire et de la climatisation, la température dans les villes où des surchauffes caniculaires sont observées serait ainsi inférieure à ce qu'elle serait naturellement et la cité deviendrait une oasis de fraîcheur (annexe VI).

Comme pour l'énergie éolienne, un des inconvénients du photovoltaïque est l'irrégularité de la fourniture d'électricité. Le développement de systèmes de stockage d'électricité à forte capacité est un enjeu important pour ces filières d'énergie renouvelable.

D'un point de vue économique, l'électricité photovoltaïque est encore loin de la compétitivité en l'absence de subventions et se positionne moins bien que l'électricité solaire thermodynamique (tableau 5.2). Néanmoins, son grand avantage réside dans sa possibilité d'intégration dans l'habitat, et c'est là indéniablement que se situe son potentiel pour les décennies à venir, sachant de plus qu'il existe des possibilités de forte réduction des coûts si cette filière se développait à grande échelle.

5.1.5 La géothermie

Après les Romains, qui utilisaient déjà les sources thermales pour s'alimenter en eau chaude, la première utilisation à l'ère industrielle de l'énergie géothermique est généralement attribuée à l'Italie au XIX^e siècle avec l'exploitation de geysers. Le mot « geyser » vient du nom d'une ville dans les montagnes Rocheuses au nord des États-Unis où de tels gisements naturels existent. Un geyser naturel est formé par une poche souterraine où s'accumule l'eau chaude (chauffée par le magma qui affleure). Suite à son élévation de température, cette eau est pressurisée et expulsée violemment au travers de failles géologiques. Un geyser artificiel est créé par un forage après repérage de nappes d'eau souterraines à haute température. On distingue généralement trois filières pour l'énergie géothermique suivant le mode d'exploitation de la chaleur extraite du sous-sol :

- la filière *électrique*,
- la filière de *production de chaleur*,
- la filière des *pompes à chaleur géothermales*.

a) La filière électrique

L'utilisation la plus simple pour la production d'électricité est la production, par un forage, de vapeur surchauffée pressurisée ; cette

vapeur est alors simplement utilisée dans une turbine de détente (après élimination des particules solides), au travers d'un cycle de Rankine [15], pour produire de l'énergie mécanique transformée ensuite en électricité. Suite à la détente, l'eau est réinjectée dans la nappe afin d'éviter son tarissement. De telles unités existent dans de nombreux pays (Italie, Californie, Nouvelle-Zélande, Japon, etc.). Pour la France c'est la centrale géothermique de Bouillante, en Guadeloupe, qui produit l'essentiel de l'électricité géothermique. Mais, pour cette technologie, l'existence de poches d'eau souterraines contenant de l'eau à haute température (de préférence supérieure à 250 °C) est souhaitée, ce qui en limite la portée.

Une technologie voisine consiste à utiliser l'eau souterraine à plus basse température. C'est le cas de la centrale d'Altheim, en Autriche, qui valorise des sources d'eau géothermique proches de 100 °C pour produire de l'électricité.

Une troisième technologie s'affranchit même de l'existence de nappes souterraines d'eau chaude. Dans ce cas, c'est la chaleur des roches souterraines, à une profondeur d'environ 5 000 m, qui est valorisée. C'est le cas de la centrale de Soultz en Alsace. De l'eau froide pressurisée est injectée à 5 000 m de profondeur à l'aide d'un puits central. Cette eau circule alors dans les fractures du sous-sol, où elle s'échauffe au contact des roches brûlantes. Deux puits d'extraction permettent à cette eau, portée à 200 °C environ, de remonter à la surface. Un cycle conventionnel de turbine à vapeur peut alors fonctionner et produire de l'électricité. L'avantage de cette technologie est qu'il existe de très nombreux sites où la température des roches à 5 000 m de profondeur est supérieure à 200 °C, si bien qu'elle semble *a priori* présenter un très fort potentiel. Par ailleurs, les technologies du forage et de la prospection sont bien maîtrisées, notamment par les industriels du pétrole. Shell estime qu'en Europe il existerait 125 000 km² de tels sites, susceptibles de produire plus que la production électrique française avec un coût du kWh_{el} produit compris entre 0,04 et 0,09 €. Outre l'unité de Soultz, plusieurs unités pilotes sont en construction en Suisse, et si les bilans s'avèrent positifs, c'est une filière qui pourrait émerger dans la seconde décennie de ce siècle.

En Europe, l'Italie est de loin le premier producteur d'électricité géothermique avec une puissance installée, en 2002, de 862 MW_{el} (sur 883 pour toute l'Europe) et une production annuelle d'électricité de 4,65 TWh (sur 4,8 pour toute l'Europe).

b) La filière géothermique de production de chaleur

Cette filière est généralement destinée à alimenter des réseaux de chaleur pour le chauffage des locaux (éventuellement pour la climatisation en utilisant un climatiseur à sorption [13]). Pour cette application, ce sont généralement des nappes phréatiques dont la température est comprise entre 50 et 130 °C qui sont utilisées. De très nombreux gisements présentant ces caractéristiques existent. Néanmoins, pour qu'ils soient valorisés, il est préférable qu'ils soient proches d'agglomérations où des réseaux de chaleur peuvent être développés. De telles nappes sont partiellement utilisées par de nombreuses agglomérations, par exemple en Ile-de-France. Il s'agit d'une filière à fort potentiel dont le développement dépend de la dissémination des réseaux de chaleur. Le développement intensif de cette filière permettrait de réduire la consommation de combustibles fossiles pour le chauffage (et la climatisation). En Europe, en 2002, l'Italie et la France étaient de loin les deux premiers producteurs avec respectivement 426 et 330 MW sur un total de 1050 MW pour l'Europe.

c) Les pompes à chaleur géothermales

La troisième filière géothermique est constituée par les pompes à chaleur géothermales (voir l'annexe V). Dans ce cas, c'est de la chaleur basse température, de 15 à 30 °C environ, qui est prélevée à l'aide d'échangeurs enterrés à faible profondeur. Cette filière connaît des développements importants dans certains pays comme la Suède où l'électricité est abondante : cela constitue en effet une excellente façon d'utiliser l'électricité pour le chauffage des locaux. En France, EDF fait un effort pour promouvoir cette filière. Notons qu'en utilisant une pompe à chaleur réversible, il est possible, avec la même unité, de chauffer un local en hiver et de le rafraîchir en été. En 2002, le nombre de pompes à chaleur géothermales en Europe était estimé à 350 000 (dont 176 000 en Suède et 74 000 en Allemagne) pour une puissance thermique de 3 280 MW (1 056 pour la Suède, 590 pour l'Allemagne, à égalité avec l'Autriche, la France venant en quatrième position avec 541 MW).

La géothermie devrait principalement contribuer à la réduction de la consommation de chaleur à partir de combustible fossile dans l'habitat et le tertiaire grâce au développement du chauffage urbain à partir de la chaleur géothermique moyenne température et des pompes à chaleur géothermales utilisant de la chaleur géothermique basse température.

5.1.6 L'hydraulique et autres énergies renouvelables

Parmi les ENR, l'hydraulique est l'énergie qui est exploitée de façon intensive depuis le plus longtemps par les pays industrialisés. À ce titre, c'est une énergie renouvelable mais pas une énergie nouvelle. C'est ainsi que les sites permettant la construction de grands barrages hydrauliques ont été exploités depuis un certain temps dans les pays les plus développés, si bien que l'énergie hydroélectrique est importante dans certains pays dont la Suède, la France, le Canada, etc. Les contributions les plus importantes à venir dans ces domaines proviendront des PED (par exemple le barrage des Trois Gorges en Chine actuellement en fin de construction). Néanmoins, certains de ces projets sont controversés, comme celui, suspendu par le gouvernement chinois, qui prévoyait la construction de treize barrages et qui menaçait une réserve naturelle de biodiversité. À condition de se limiter aux sites qui ne détruisent pas l'écosystème, l'énergie hydroélectrique présente une spécificité particulièrement intéressante, qui est de pouvoir contribuer au stockage de l'électricité. En effet, pendant les heures creuses, il est possible de pomper l'eau dans les barrages, et de la « turbiner », donc produire de l'électricité, aux heures de pointe. Cette technique est couramment utilisée en France par EDF.

La petite hydraulique (installations de moins de 10 MW) présente encore des possibilités de développement même dans les pays les plus développés. C'est ainsi que dans l'Union européenne, plusieurs milliers de mégawatts supplémentaires pourraient être produits par de telles installations. L'AIE prévoit une augmentation de 50 % d'ici 2030 de la production d'énergie d'origine hydraulique, avec un doublement pour les PED.

Il existe enfin plusieurs autres sources possibles d'ENR : l'énergie des vagues (hydroliennes), celle des marées, le plancton des fonds marins, etc. Certaines de ces sources d'énergie seront vraisemblablement utilisées dans les décennies à venir, de même que des sources d'énergie encore à découvrir, mais il est peu probable qu'elles aient un réel impact d'ici 2030.

5.1.7 Bilan des énergies renouvelables à l'horizon 2030

Nous allons maintenant tenter de répondre à la question posée à la fin du chapitre précédent : est-il possible d'envisager produire, en 2030, 1 500 Mtep supplémentaires (par rapport aux projections de l'AIE) à partir des ENR ?

Quelles peuvent être les contributions de la biomasse et de l'énergie éolienne en 2030 ? Nous baserons notre estimation sur les prévisions

de l'Union européenne. L'objectif européen de 132 Mtep produits à partir de la biomasse en 2010 sera difficilement atteint. Toutefois la prise en compte du changement climatique dans la PAC et les mesures récentes (crédit-carbone pour les agriculteurs), ainsi que celles en préparation, laissent augurer une percée de la biomasse à l'échéance de 2030. Nous tableons donc sur un objectif de 250 Mtep en 2030 (120 Mtep pour le bois, 50 Mtep pour les biocarburants et 80 Mtep pour le biogaz). Une telle valeur suppose qu'une partie des terres cultivées soit dédiée aux cultures énergétiques, et donc que l'Europe soit éventuellement amenée à importer des produits agricoles pour l'alimentation. Par ailleurs, cela suppose également un traitement intensif des déchets agricoles pour la production de biogaz. Par conséquent, les émissions de méthane d'origine agricole (41 % des émissions totales de ce gaz en Europe, rappelons-le) seraient fortement réduites, ce qui permettrait de limiter d'autant l'effet de serre. En supposant une production de 250 Mtep pour la biomasse en Europe et sachant que l'Union européenne représente le quart des ENR mondiales, nous aurions donc 1 000 Mtep pour la biomasse dans le monde.

En ce qui concerne l'énergie éolienne, la tendance actuelle du développement amène à projeter une production de 650 TWh en 2030 pour l'Union européenne. Au niveau mondial, en supposant à nouveau que l'Union représente le quart de la production, cela conduirait à 2 600 TWh, ce qui équivaut à environ 700 Mtep d'énergie primaire.

Les autres ENR hors hydraulique (géothermie et solaire) sont relativement marginales et nous supposons qu'elles n'atteindront que 100 Mtep en 2030.

Le total des ENR (hors hydraulique) s'élèverait donc à 1 800 Mtep en 2030 (2 200 en incluant l'hydraulique) alors que l'AIE prévoyait 618 Mtep, soit un surplus de 1 200 Mtep. L'objectif des 1 500 Mtep ne serait pas tout à fait atteint mais, nous verrons plus loin que les 300 Mtep manquantes pourraient être compensées par de la capture et de la séquestration de carbone, qui correspondraient à des émissions évitées. Certes, atteindre 1 800 Mtep d'ENR (hors hydraulique) en 2030 représente un défi ambitieux, mais compte tenu des politiques annoncées, il semble pouvoir être relevé.

5.1.8 Maîtriser l'effet de serre grâce aux ENR

Nous venons de voir que les ENR pouvaient à moyen terme représenter une proportion significative de l'énergie mondiale, et ainsi contribuer à diminuer les émissions de GES dues à l'utilisation des

combustibles fossiles. Or ce n'est pas leur seule influence sur l'effet de serre : dans l'annexe I en effet, nous montrons que les ENR prélèvent de l'énergie à la surface de la terre et, de fait, constituent un « forçage radiatif négatif » susceptible d'atténuer le forçage radiatif positif provoqué par l'effet de serre. Cette contribution au forçage radiatif négatif des ENR est d'autant plus importante que le recours aux ENR est intensif.

a) Consommation d'ENR requise pour maîtriser l'effet de serre

Nous définissons, toujours dans l'annexe I, un critère de maîtrise de l'effet de serre : chaque année le forçage radiatif négatif dû aux ENR doit compenser le forçage radiatif positif dû aux émissions de GES.

Compte tenu du niveau actuel de ces émissions, la maîtrise de l'effet de serre ainsi définie exigerait une consommation annuelle d'ENR équivalente à 20 000 Mtep. Nous sommes très loin du compte puisqu'en 2000 cette consommation s'élevait à 450 Mtep, énergie hydraulique comprise (voir tableau 2.5).

Plutôt que de façon globale, le critère pourrait être appliqué individuellement aux différents pays. Le tableau 5.3 donne l'évaluation de la consommation en ENR souhaitée (en 2000), obtenue en se basant sur les chiffres d'émission de CO₂ fournis par l'AIE [5].

TABLEAU 5.3 ÉVALUATION DE LA PRODUCTION D'ÉNERGIE À PARTIR DES ENR SOUHAITÉE EN 2000 POUR MAÎTRISER L'EFFET DE SERRE DANS CHAQUE RÉGION.

Région	Consommation énergétique (Mtep)	Émission CO ₂ (Mt)	Critère ENR (Mtep)	ENR réelles (Mtep)
États-Unis + Canada	2 551	6 175	5 455	156
UE dont France	1 456 275	3 146 360	2 780 318	87 28

À l'avenir, ce critère pourrait devenir un critère important d'évaluation de l'effort consenti par les pays pour lutter contre l'effet de serre. Avec notre scénario alternatif, notre évaluation pour la production d'énergie à partir des ENR pour 2030 atteint environ 2 200 Mtep (hydraulique comprise), ce qui ne représente qu'environ 10 % des 20 000 Mtep nécessaires pour compenser le forçage radiatif positif dû à l'utilisation des combustibles fossiles. On constate donc que durant toute cette période 2000-2030, la maîtrise de l'effet de serre ne sera pas atteinte.

Toutefois, cette production souhaitée d'ENR (d'environ 20 000 Mtep) se rapproche de la moitié de celle envisagée pour 2100. Cela signifie que si, dans un avenir certes encore lointain, les ENR correspondaient à une part importante de la production d'énergie, il n'est pas irréaliste d'envisager que le forçage négatif qu'elles engendrent puisse compenser le forçage radiatif positif dû à l'effet de serre. Un scénario à long terme tout à fait envisageable est celui où la concentration en CO₂ serait beaucoup plus élevée que sa valeur actuelle (entre 600 et 1 000 ppmv) et où une utilisation intensive des ENR (plus les aérosols et autres phénomènes à forçage négatif liés à l'activité humaine) provoquerait un important forçage négatif capable de compenser le forçage radiatif positif dû à l'effet de serre. Un tel équilibre correspondrait à une véritable maîtrise de l'effet de serre.

b) Nouveau régime permanent à fort effet de serre et forte consommation énergétique

Jusqu'à présent, nous avons considéré le cas où la consommation d'ENR était faible. Maintenant, comme nous venons de l'évoquer, nous allons nous projeter loin en avant (vers 2100), en supposant que la consommation d'énergie serait alors de 30 000 Mtep, dont 20 000 Mtep d'ENR et un peu moins de 10 000 Mtep de combustibles fossiles (le reste serait fourni par le nucléaire, neutre vis-à-vis de l'effet de serre). À ces 20 000 Mtep d'ENR correspond un forçage négatif d'environ 0,06 W/m². En l'absence d'effet de serre, ce forçage négatif se traduirait par une baisse de température de 0,017 °C par an (annexe I). On constate ainsi que l'utilisation intensive des ENR peut provoquer un abaissement de température si elle n'est pas accompagnée par des émissions de GES. Cette remarque est essentielle lorsqu'on pose la question de l'irréversibilité de l'effet de serre : si à un moment donné, on décide de suspendre les émissions de GES et que dans le même temps on décide une utilisation intensive des ENR, on a la possibilité de provoquer un refroidissement planétaire. Cet argument ne vaut pas si c'est l'énergie nucléaire qui est utilisée de façon intensive, car le nucléaire permet de ne pas augmenter l'effet de serre mais pas d'éliminer celui qui existe déjà.

Revenons à notre cas vers 2100 où l'utilisation des ENR provoque un forçage négatif de 0,06 W/m². Si les émissions de GES sont telles qu'elles provoquent un forçage radiatif positif de 0,06 W/m², alors la température de la planète ne sera pas modifiée. Ce sera le résultat obtenu si l'augmentation de la teneur en CO₂ équivalent se maintient à 2,8 ppmv/an. La conclusion importante est que l'on pourra donc

continuer à émettre des GES au rythme actuel à la condition expresse d'utiliser des ENR de façon intensive, typiquement l'équivalent de 20 000 Mtep par an.

c) Retour à l'équilibre pré-industriel

Poussons notre raisonnement vers des échéances encore plus éloignées, par exemple vers 2200, lorsque les hydrocarbures devraient être épuisés et que, parmi les combustibles fossiles, seul subsisterait le charbon. Les ENR représenteraient alors la très grande majorité de la consommation énergétique, et dans ce cas le forçage négatif engendré devrait l'emporter sur le forçage radiatif positif dû à l'augmentation de l'effet de serre : on rentrerait donc dans une période de refroidissement planétaire. Dans un premier temps, ce refroidissement serait salutaire car il permettrait de tendre à nouveau vers la température de la période pré-industrielle, mais il est possible qu'il devienne rapidement excessif. Dans ce cas, une façon de pallier ce refroidissement planétaire serait de déstocker une partie du CO₂ préalablement séquestré durant la période du réchauffement planétaire (voir le chapitre 6).

En fait l'équilibre de température pré-industriel correspondait à un cas de consommation quasi nulle d'énergie. Dans la phase intermédiaire que nous vivons actuellement de déstockage intensif des combustibles fossiles, on assiste à une période de réchauffement planétaire qui risque très rapidement de devenir insupportable et exige donc des mesures radicales. Mais cette période de déstockage des combustibles fossiles est de fait limitée par l'épuisement inévitable des combustibles fossiles. Dans ces conditions, il semble vraisemblable qu'un recours intensif aux ENR soit nécessaire et, dans ce cas, on peut prévoir un nouvel équilibre dans lequel deux contributions se compenseront : l'effet de serre dû au forçage radiatif positif engendré par une concentration élevée de GES et le forçage négatif dû à l'utilisation intensive des ENR. Un équilibre global à la température pré-industrielle correspondrait nécessairement à une teneur plus élevée en GES qu'à cette époque car il faudrait compenser le forçage négatif dû au recours intensif aux ENR.

5.1.9 Conclusion sur les ENR

À l'heure actuelle, la situation des ENR est très hétérogène : certaines émergent alors que d'autres restent encore confidentielles. Comme nous l'avons vu, il faut mettre à part l'énergie hydraulique, qui est déjà largement utilisée dans les pays les plus industrialisés et qui se

développe fortement dans les PED. Parmi les autres ENR, l'énergie éolienne se détache actuellement par sa percée en Europe et par son potentiel, notamment offshore, qui ouvre des perspectives considérables. Sur le plan économique, l'électricité éolienne devient compétitive dès lors que des conditions acceptables de rachat de l'électricité sont accordées. Des politiques cohérentes tarifaires de rachat de l'électricité éolienne ainsi qu'une gestion intelligente des certificats verts devraient permettre à cette industrie naissante de devenir rapidement florissante. Néanmoins, pour un développement harmonieux de cette ENR, il est essentiel de tenir compte des réserves soulevées, de consulter les populations concernées et de consentir un effort d'explication des nuisances de cette technologie afin d'éviter un rejet de cette source précieuse d'énergie.

La seconde ENR qui se distingue est la biomasse, avec deux filières : les cultures énergétiques destinées aux biocarburants et le traitement des déchets agricoles et urbains pour la production de biogaz et la cogénération. Alors que la filière des cultures énergétiques est limitée par la compétition avec les autres cultures, la filière du biogaz par le traitement des déchets semble ouvrir une voie tout à fait remarquable. De plus, elle constitue un puits de gaz à effet de serre, ce qui est tout à fait exceptionnel. Cette filière ouvre donc des perspectives nouvelles à l'agriculture traditionnelle en lui permettant de pouvoir bénéficier de la rente énergétique, réservée pour l'instant aux producteurs de combustibles fossiles.

L'énergie solaire offre des perspectives immédiates pour le solaire thermique basse température mais son impact environnemental est limité. En revanche, l'avenir de l'électricité solaire se dessine à plus long terme mais avec un impact potentiel important, aussi bien pour le thermodynamique que pour le photovoltaïque. Ce dernier, qui est encore loin de la compétitivité économique, aura certainement un grand rôle à jouer dans l'avenir grâce à son intégration dans l'habitat et de son potentiel pour lutter contre les canicules dans les villes les plus exposées à ce fléau. Néanmoins, avec moins de 100 Mtep, nous ne considérerons pas que l'énergie solaire jouera un rôle important dans les bilans énergétiques de 2030, dans lesquels nous avons évalué, au mieux, la contribution totale des ENR à 1 800 Mtep (hors hydraulique) alors que l'AIE les situe à 618 Mtep.

Nous l'avons vu, les ENR contribuent à lutter contre l'effet de serre en permettant de diminuer les émissions de GES dues à l'utilisation des combustibles fossiles. Elles peuvent même, grâce au forçage négatif, contribuer à le faire diminuer. Un argument supplémentaire qui

plaide en faveur de leur utilisation massive vient des effets secondaires résultant du réchauffement planétaire, et en particulier l'intensification des tempêtes, cyclones et tornades, traduction sous forme d'énergie cinétique de l'excès d'énergie à la surface du globe. L'utilisation intensive des ENR, et notamment de l'énergie éolienne, permettra de puiser dans ce réservoir d'énergie pour en amortir les effets néfastes.

Aujourd'hui, l'enjeu est simple : pour compenser l'augmentation importante des émissions de GES, il est indispensable de capter une petite partie de l'énergie disponible à la surface de la terre afin de produire un forçage négatif qui compense le forçage radiatif positif dû à l'utilisation de combustibles fossiles.

En fait, avec cette vision de notre avenir énergétique, non seulement l'effet de serre n'est pas une catastrophe, mais c'est même un bienfait que les générations futures apprécieront car il va nous obliger à développer les ENR et à séquestrer du CO₂ dont elles auront besoin plus tard.

5.2 L'ÉNERGIE NUCLÉAIRE

L'énergie nucléaire existe sous deux formes : la fission et la fusion. Pour l'instant seule la fission est maîtrisée à des fins civiles : c'est elle qui est utilisée dans les centrales électronucléaires. Maîtrisée à des fins militaires (la bombe H), la fusion ne l'est pas encore à des fins civiles où elle n'est encore qu'au stade de la recherche. Le programme international de recherches ITER vise à maîtriser la fusion à des fins de production d'énergie.

Dans les deux cas une réaction nucléaire produit de l'énergie avec une très grande densité (d'où son utilisation à des fins militaires). Dans le cas de la fission, cette énergie n'est pas une énergie renouvelable car le combustible nucléaire utilisé est une ressource naturelle vouée à l'épuisement. Les réserves prouvées en uranium s'élèvent à près de 3 millions de tonnes, correspondant à environ cent ans d'exploitation [4]. En revanche, l'énergie nucléaire résultant de la fusion est considérée comme une énergie renouvelable car elle ne dépend pas d'une source de combustible épuisable (l'hydrogène).

Dans ce paragraphe, nous allons passer en revue un certain nombre d'arguments techniques, économiques et environnementaux en faveur et en défaveur de la filière électronucléaire. Le débat en France sur l'énergie nucléaire est quelque peu faussé dans la mesure où l'électronucléaire a été porté aux nues par toute une partie de nos dirigeants et totalement dénigré par la très grande majorité des écologistes sans

qu'un véritable dialogue se soit instauré. À noter que dans les pays anglo-saxons, plus de transparence existe autour du nucléaire et qu'un dialogue sur ce thème sensible existe.

5.2.1 Les inconvénients de l'énergie nucléaire

Il est tout d'abord important de noter que dans la filière électronucléaire, si la réaction nucléaire met en œuvre de la haute technologie, elle ne délivre que de la chaleur qui n'est pas la forme la plus noble de l'énergie. En effet, les énergies nobles sont celles qui correspondent à une entropie nulle, comme le travail mécanique ou l'électricité par exemple, alors que la chaleur correspond à une entropie qui dépend du niveau de température d'utilisation de la chaleur produite. Ainsi, plus la chaleur est utilisée à haute température, plus elle est noble [15]. Le fait de transformer une énergie noble (l'énergie nucléaire) en chaleur est une faiblesse de la filière électronucléaire. À l'opposé, de façon beaucoup plus noble, le rayonnement solaire est directement transformé en électricité par l'énergie photovoltaïque, et en matière par la photosynthèse.

La réaction nucléaire produit donc de la chaleur qui doit ensuite être transformée en électricité. Pour cela, il faut d'abord transférer cette chaleur depuis le cœur du réacteur vers un système où un cycle thermodynamique sera utilisé. C'est ici que réside la première faiblesse de l'électronucléaire car il y a une forte dégradation de l'énergie à l'occasion de ce transfert. En effet, le fluide thermique souvent utilisé est de l'eau pressurisée qui fournit à la source chaude du cycle thermodynamique de la chaleur vers 300 °C. On utilise donc une turbine à vapeur, dont le rendement est seulement de 0,34 alors que dans les filières thermiques classiques, des cycles combinés permettent d'atteindre des rendements supérieurs à 0,5 (typiquement 0,52). Un tel cycle combiné ne peut pas être utilisé avec la filière électronucléaire car la température de la source chaude n'est pas assez élevée (annexe II). Paradoxalement, la filière électronucléaire est donc basée sur une technologie de pointe (celle du réacteur nucléaire) mais couplée à une technologie limitée (celle de la turbine à vapeur), tout cela en raison du couplage thermique défectueux entre le réacteur nucléaire et le système thermodynamique. Il faut noter que la nouvelle version de réacteur, l'EPR, ne résout pas ce problème et n'aura pas un meilleur rendement. La seule innovation dans ce domaine était Super Phénix qui utilisait le sodium fondu comme fluide thermique et aurait autorisé l'utilisation d'un cycle combiné, et donc l'obtention de rendements plus élevés. Ce faible rendement de la filière électronucléaire, pénalisant en soi, présente un autre inconvénient : les centrales nucléaires rejettent deux fois plus de

chaleur qu'elles ne produisent d'électricité, ce qui pose de sérieux problèmes pour les rivières ou fleuves avoisinants car les rejets à haute température affectent la flore et la faune de ces cours d'eau. C'est ainsi que pour les centrales nucléaires françaises, durant l'été caniculaire 2003, les normes de niveau de température des rejets thermiques n'ont pas été respectées. Il est à noter que pour une même production d'électricité, une centrale électrique avec un cycle combiné rejeterait moins de chaleur (annexe II).

Le second point faible des centrales électronucléaires est qu'elles ne permettent pas une utilisation rationnelle de l'énergie grâce à la cogénération car, étant de très grande puissance, elles sont situées loin des centres urbains. Des tentatives de valorisation de la chaleur (chauffage de serres agricoles) existent bien mais cela reste très marginal. Or pour les centrales électriques, la tendance actuelle est de développer des installations à haut rendement (0,52) ou de valoriser les rejets thermiques des unités de cogénération dont le rendement est faible (de l'ordre de celui des centrales électronucléaires). Le rendement d'une centrale nucléaire est typiquement celui d'une unité de cogénération mais sans présenter l'avantage de la valorisation de la chaleur (qui, rappelons-le, permet d'obtenir globalement des rendements supérieurs à 0,8).

Le troisième point faible de la filière électronucléaire est la sûreté. Les centrales nucléaires correspondent à de très fortes puissances (les tranches actuelles sont de 1 000 MW_{el} et une seule centrale comprend souvent plusieurs tranches), et un accident sur le cœur du réacteur – heureusement il y en a très peu ! – a tout de suite des conséquences dramatiques, comme ce fut le cas à Three Mile Island aux États-Unis ou à Tchernobyl en Ukraine. Ces accidents, combinés au souvenir des effets des bombes atomiques de la Seconde Guerre mondiale, font que l'énergie nucléaire jouit d'une image très défavorable auprès des opinions publiques des pays les plus développés. Même en France, où la sûreté nucléaire a merveilleusement fonctionné jusqu'à présent, l'accident de Tchernobyl, avec son nuage radioactif qui, d'après les autorités nucléaires françaises de l'époque, aurait contourné nos frontières, a laissé un souvenir déplorable sur l'authenticité de la communication sur le nucléaire. Les craintes sur la sûreté sont renforcées depuis les attentats du 11 septembre 2001 dans la mesure où certains prétendent qu'aucune centrale nucléaire (pas même la nouvelle version EPR) ne résisterait à la percusion d'un avion gros porteur.

Le traitement des déchets nucléaires est également lié à la sûreté et, pour l'instant, c'est un point délicat qui soulève beaucoup de

polémiques, en particulier de la part des riverains lorsqu'un laboratoire sous-terrain de stockage de déchets nucléaires est implanté sur un site. En fait, c'est toute la chaîne du traitement, depuis l'extraction, le transport, jusqu'au stockage sous-terrain, qui pose des problèmes et suscite beaucoup de passions à chacun de ses maillons. Ce problème des déchets, conjugué à celui des ressources limitées, fait en tout cas que l'énergie nucléaire ne participe pas au développement durable puisque c'est une énergie épuisable qui altère l'environnement.

La situation en ce qui concerne les opinions publiques est différente dans les PED, pour lesquels l'accès à l'énergie nucléaire est vécu comme l'entrée dans un club de VIP. Il est intéressant de noter que les unités électronucléaires en construction et en commande le sont majoritairement dans des PED : Argentine, Chine, Corée (Nord et Sud), Inde, Iran, etc. Le Japon est l'un des rares pays industrialisés à poursuivre la construction de centrales nucléaires [16]. La question est posée sur les garanties quant à la démarche qualité pour assurer la sûreté dans certains de ces pays, sachant qu'un accident sur le cœur du réacteur d'une centrale nucléaire peut avoir des conséquences à l'échelle de la planète.

Une caractéristique des centrales nucléaires, qui en constitue également un point faible, est qu'elles doivent fonctionner à charge à peu près constante, c'est-à-dire qu'elles ne peuvent pas répondre à de fortes pointes de consommation. Cette caractéristique est favorable pour répondre à la consommation de base en électricité (heures creuses, HC) mais elle est pénalisante pour répondre aux besoins importants (heures pleines, HP). Cela est particulièrement handicapant lorsque l'on sait que le prix de vente HC est beaucoup plus bas que le tarif HP. Cette différence risque en outre de s'amplifier à l'avenir, c'est-à-dire qu'un producteur d'électricité fournissant une grande quantité d'électricité aux heures creuses pourrait avoir un chiffre d'affaires plus faible qu'un concurrent fournissant beaucoup moins d'électricité mais aux heures de pointe.

Un autre point faible du nucléaire est le coût d'investissement d'une centrale. Si l'on compare une centrale électrique classique et une centrale nucléaire, dans les deux cas, il y a un système thermodynamique (la turbine à vapeur) mais dans la centrale classique, il suffit d'y adjoindre un brûleur alors que dans le cas de la centrale nucléaire, il faut y adjoindre un réacteur nucléaire (avec tous les systèmes de sûreté) qui fait appel à une technologie très onéreuse. Les coûts d'investissement d'une centrale nucléaire sont environ le double, voire plus, de ceux d'une centrale classique fonctionnant au gaz naturel.

5.2.2 Les avantages de l'énergie nucléaire

Le gros avantage, en termes d'effet de serre, de l'énergie nucléaire est qu'elle n'utilise pas de combustible fossile et ne rejette aucun gaz à effet de serre.

Le second point positif des centrales nucléaires était, jusqu'à une époque récente, que leur coût d'exploitation était inférieur à celui des autres filières (la question de la prise en compte du coût du démantèlement des centrales et son intégration dans le coût d'exploitation reste cependant ouverte). Néanmoins, dans l'ouvrage *Énergie 2010-2020, Les chemins d'une croissance sobre* [17], EDF affirme que la marge de compétitivité du nucléaire fond alors que jusqu'en 1993 le kilowattheure nucléaire était environ 30 % moins cher que le kilowattheure des combustibles fossiles. Ce rapport va fortement dépendre dans l'avenir du coût des combustibles fossiles, dont le gaz naturel. Cette réserve émise par EDF à l'esprit, considérons néanmoins que le kilowattheure nucléaire est moins cher que le kilowattheure des combustibles fossiles. Si l'on tient compte du fait que le nucléaire ne peut pas profiter pleinement des prix élevés des heures de pointe, il n'est pas évident que le plus faible coût d'exploitation soit un avantage décisif. En effet, le coût d'investissement élevé combiné à un prix moyen de vente de l'électricité faible (majoritairement tarif HC) n'incite pas les producteurs d'électricité à se précipiter vers le nucléaire, sauf dans les pays où la pénurie d'électricité est très forte. De fait, dans les pays les plus avancés dans la libéralisation du marché électrique, on constate surtout la création de compagnies de production d'électricité visant le marché de la production en HP, lorsque les prix sont élevés, ou en cogénération, lorsque l'électricité et la chaleur sont valorisées. En effet l'investissement dans des centrales électriques conventionnelles (turbine à gaz par exemple, ou cycles combinés) ou dans des unités de cogénération n'est pas très important. Deux options existent alors : utiliser des centrales à haut rendement électrique pour produire l'électricité lorsqu'elle est chère, ou bien utiliser des unités de cogénération à plus faible rendement électrique mais qui permettent également de valoriser la chaleur. Aucune de ces deux options ne donne une opportunité à l'électronucléaire. Dans ces conditions, cela n'incite pas les producteurs d'électricité à investir sur ce créneau, et il est caractéristique, par exemple, qu'en France, ce ne soit pas EDF (le producteur d'électricité) mais Areva (l'industriel constructeur de centrales) qui pousse à investir dans le nucléaire.

5.2.3 Quel avenir pour l'énergie nucléaire ?

L'énergie nucléaire se trouve ballottée entre ses défenseurs inconditionnels, qui affirment que c'est la seule solution pour maîtriser l'effet de serre, et ses détracteurs, tout aussi inconditionnels, qui mettent en avant les défauts que nous avons présentés. Les décideurs politiques, en France du moins, éprouvent sur ce point de très grandes difficultés à trancher. La seule décision qui ait été prise a été de construire une unité EPR qui correspond à la troisième génération de réacteurs nucléaires français. La loi d'orientation française sur les énergies de 2004 a en effet confirmé le choix du réacteur EPR, mais elle insiste également sur la nécessité d'économiser les énergies et de les diversifier pour lutter contre l'effet de serre. Le coût du réacteur pilote est estimé à 3 milliards d'euros (une centrale à cycle combiné au gaz naturel coûterait près de cinq fois moins cher). Le début de sa construction est prévu en 2007 pour une mise en route en 2012. Cette génération de réacteurs est destinée à remplacer les cinquante-huit réacteurs qui équipent actuellement les dix-neuf centrales nucléaires françaises. Avec un tel coût d'investissement, c'est près de 180 milliards d'euros qu'EDF devra déboursier pour renouveler l'ensemble du parc nucléaire français. On comprend qu'à ce tarif, EDF ne soit pas pressé à renouveler le parc et qu'elle déploie beaucoup d'efforts pour augmenter la durée de vie des centrales.

Il ne fait aucun doute que la libéralisation du marché de l'énergie n'aide pas le nucléaire et que, dans ces conditions, les perspectives de développement à grande échelle du nucléaire à moyen terme sont très limitées. Il est remarquable que, dans ses prévisions pour 2030, l'AIE prévoit seulement 5 % de l'énergie primaire pour le nucléaire contre 6 % pour la somme de l'hydraulique et des autres ENR. Il est également intéressant de noter que l'AIE prévoit que le nucléaire baisse de 7 % entre 2010 et 2030. En fait, il semble bien qu'actuellement ce ne sont pas, comme dans les années 1970, les antinucléaires qui freinent le développement du nucléaire mais beaucoup plus le contexte économique. Si l'on ajoute qu'entre la décision de relancer une stratégie nucléaire et la mise en service d'une centrale, le délai est de quinze à vingt ans (sans négliger les possibilités d'annulation), on peut affirmer sans risque d'erreur que le nucléaire ne sera pas la solution pour résoudre le problème de l'effet de serre à court terme.

Dans le bilan énergétique prévisionnel 2030, il paraît donc exclu que le nucléaire puisse augmenter sa production de 200 Mtep par rapport aux prévisions de l'AIE (qui le placent à 703 Mtep), comme il le faudrait pour maintenir la consommation d'énergie fossile au niveau

de 2000. C'est donc du côté des puits de CO₂ qu'il faut chercher la solution, comme nous allons le voir au chapitre suivant.

Il faut noter pour conclure que des recherches en cours sur les cycles du combustible fissile dans le réacteur pour la filière à fission visent à réduire la consommation de combustible fissile, ce qui aura pour résultat d'une part d'allonger considérablement le temps d'utilisation de l'énergie nucléaire (d'environ cent ans, la durée d'utilisation passerait à plusieurs milliers d'années) et d'autre part de faciliter le traitement des déchets en réduisant les quantités à manipuler et à stocker. Si des sauts technologiques étaient atteints dans ces deux directions (réduction de la consommation de combustible fissile et de la production des déchets), l'énergie nucléaire se rapprocherait du principe du développement durable, sans toutefois l'atteindre. C'est ainsi qu'une installation correspondant à une nouvelle génération de réacteurs à neutrons rapides et à sel fondu fonctionnant suivant le mode « incinérateur » pourrait être construite en France pour démonstration d'ici quelques années. Cependant, cette nouvelle génération de réacteur nucléaire ne résoudrait que partiellement le problème du faible rendement de conversion en électricité de la chaleur produite par le réacteur (ce rendement dépasserait légèrement 0,4). Ces nouveaux développements seront des arguments qui pourraient faciliter un rebond du nucléaire aux alentours des années 2030, à condition que les coûts d'investissement soient également réduits.

Chapitre 6

Les puits de carbone (ou de CO₂)

Dans la mesure où il est maintenant prouvé que c'est à cause des GES (CO₂, méthane et autres gaz) que se produit le réchauffement planétaire, il s'agit d'en diminuer les concentrations. Il y a deux moyens : soit réduire leurs émissions, soit créer des *puits* de GES.

De même qu'une émission de CO₂ résulte de l'existence d'une source, on introduit la notion de puits lorsqu'on constate une *capture* de CO₂. La capture peut être naturelle (avec la photosynthèse, qui capture le CO₂ pour produire de la végétation, ou les océans), mais aussi provoquée par l'homme (c'est ainsi qu'on peut capturer le CO₂ en sortie de centrales thermiques). À la notion chimique de capture, nous ajouterons celle de *séquestration* : la séquestration du CO₂ consiste à l'emprisonner sans l'altérer, par exemple dans des cavités géologiques. On utilise parfois également le terme de *stockage*, bien que certains auteurs estiment que, contrairement à la séquestration, le stockage sous-entend une éventuelle réutilisation ultérieure.

L'histoire du climat nous indique que dans les temps géologiques, et suite à l'apparition de la végétation, notre planète a su naturellement trouver un équilibre de teneur de dioxyde de carbone (figure 1.2). Ce sont les plantes qui ont alors joué le rôle de puits de carbone. Pourquoi ne pourrait-on pas reproduire cette baisse de la teneur en CO₂ en créant artificiellement des puits de carbone ?

6.1 CAPTURE ASSISTÉE DU DIOXYDE DE CARBONE PAR LA BIOSPHERE

Nous avons la chance que la nature sache spontanément capturer le CO_2 de l'atmosphère pour le transformer en produits carbonés soit au travers de la photosynthèse soit en l'absorbant dans les océans. Le problème est que cette absorption naturelle est lente et, qu'à l'heure actuelle, elle est très inférieure aux émissions dues au déstockage du charbon et des hydrocarbures. Quels sont les moyens dont on dispose aujourd'hui pour intensifier cette capture naturelle du CO_2 par la biosphère ?

6.1.1 Reboisement et cultures énergétiques à haut rendement

Il est reconnu que la déforestation contribue au renforcement de l'effet de serre. En détruisant les forêts, l'activité humaine réduit la capacité de la biosphère à capter le dioxyde de carbone. En priorité, il faut inverser cette tendance en favorisant le reboisement et en prenant des mesures réglementaires pour empêcher la déforestation. D'ores et déjà, des organismes subventionnent des actions permettant de lutter contre la désertification et favorisant le reboisement. Compte tenu de l'enjeu et de l'ampleur du problème, il faudrait fortement amplifier cet effort. Nous avons déjà mentionné au paragraphe 2.1.1. que la sylviculture et la politique de boisement des terres agricoles faisaient partie intégrante de la PAC en Europe. D'autres pays adoptent des positions voisines.

Par ailleurs, l'augmentation de la teneur en dioxyde de carbone accompagnée d'une augmentation de température a un effet favorable pour la croissance de certains végétaux à condition que l'eau soit disponible. Des études indiquent que certaines espèces végétales voient leur croissance accélérée de 30 % si la teneur en dioxyde de carbone double [21].

Or, au rythme actuel, la teneur en CO_2 aura presque doublé par rapport à l'ère préindustrielle dans la deuxième moitié de ce siècle. Une sélection adéquate d'espèces végétales (celles dont il serait possible d'augmenter le rendement de la photosynthèse jusqu'à 30 %) fournirait une façon efficace d'intensifier la capture d'une partie du dioxyde de carbone émis par ailleurs. Ce point est fondamental, car ce doit être la base de la domestication de l'effet de serre : l'homme doit être capable, en assistant la nature, de capter plus de carbone que ne le

faisait la nature seule avant l'industrialisation. L'augmentation de la teneur en CO₂ et l'élévation de température sont les facteurs positifs qui permettront d'amplifier la capture du CO₂ par la végétation, qui doit impérativement être mobilisée dans la lutte contre l'effet de serre. Cela demandera des efforts de recherches et développements afin de sélectionner les espèces les plus adaptées à cette nouvelle donne climatique et les plus rentables du point de vue de la capture du CO₂. La biomasse ainsi produite pourrait d'ailleurs efficacement être convertie en énergie, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, que ce soit pour les transports, ou pour la production d'électricité et de chaleur au travers de la cogénération.

Par ailleurs, il est possible de renforcer cette capture naturelle du CO₂ en développant des cultures (par exemple maraîchères) sous serre et atmosphère contrôlée plus riche en dioxyde de carbone (nous verrons plus loin que le problème de la réutilisation du dioxyde de carbone capturé sur les centrales thermiques produisant de l'électricité va se poser dans un avenir proche).

Enfin, dans cet effort de domestication de l'effet de serre, les mers, océans et lacs ne doivent pas être négligés car ils contribuent également au stockage du carbone.

Il est essentiel de renforcer la capture de dioxyde de carbone assistée par l'homme pour deux raisons :

- elle permet d'absorber une partie du carbone contenu dans l'atmosphère et donc de réduire l'effet de serre. De cette façon, l'augmentation du stock de carbone dans la biosphère (végétation + océans) entraîne une diminution équivalente du stock de carbone dans l'atmosphère (la quantité de carbone dans l'atmosphère, la biosphère et le sous-sol est globalement constante) ;
- elle permet d'utiliser à des fins énergétiques une partie de cette végétation produite. Ceci permettra dans l'avenir de substituer, en partie, la biomasse à des combustibles fossiles.

Il faut cependant être vigilant avec le renforcement de l'agriculture car cette capture renforcée du dioxyde de carbone peut avoir un effet pervers au travers des émissions de méthane dues à la décomposition des déchets agricoles. Nous avons déjà mentionné qu'à l'heure actuelle le forçage radiatif du méthane était le tiers de celui du dioxyde de carbone. Si on augmente la capture du dioxyde de carbone sans traiter les déchets agricoles, cela va entraîner de fait une augmentation des émissions de méthane, et donc réduire l'effet positif de la capture. C'est pourquoi il est essentiel de coupler cette démarche d'augmentation

de la capture assistée par l'agriculture à une démarche complémentaire de traitement des déchets agricoles et urbains.

6.1.2 Traitement des déchets agricoles et urbains

L'augmentation constatée et prévue des émissions de méthane dues à l'activité humaine (agriculture, élevage et déchets urbains) est une préoccupation majeure à l'heure actuelle. C'est ainsi que dans ses prévisions d'émissions de GES, le GIEC anticipe pour 2050 soit un doublement des émissions de méthane, soit, au mieux, une très faible augmentation, suivant le scénario.

Tableau 6.1 Évolution des émissions annuelles de GES provenant des combustibles fossiles et du méthane.

Émissions/année	1990	2050	
		Scénario A	Scénario B
Équivalent carbone provenant des combustibles fossiles	6 GtC-eq	23 GtC-eq	11 GtC-eq
Émissions de méthane	0,31 Gt CH ₄	0,63 Gt CH ₄	0,36 Gt CH ₄
Équivalent carbone	1,94 GtC-eq	3,95 GtC-eq	2,25 GtC-eq

D'après le GIEC [1].

Afin de parvenir à une très faible augmentation, voire une diminution, il faut introduire une gestion différente des déchets dans l'agriculture. En effet, le développement de l'agriculture et de l'élevage intensifs a eu pour conséquence des émissions de méthane importantes. Or, il est possible non seulement de limiter ces émissions mais, mieux, de les canaliser pour produire du biogaz, qui peut ensuite être valorisé. L'homme de la préhistoire a su maîtriser la nature pour assurer son alimentation à travers le développement de l'agriculture et de l'élevage ; il s'agit maintenant ni plus ni moins que de savoir maîtriser l'agriculture et l'élevage en termes d'effet de serre grâce à un traitement judicieux des déchets. Il s'agit de plus de tirer avantage de ce traitement pour créer un approvisionnement énergétique nouveau pour notre planète. Le défi est donc de transformer notre agriculture, source de GES, en une agriculture puits de GES. Ceci est techniquement possible.

La question ouvertement posée actuellement est la suivante : le traitement des déchets agricoles constitue-t-il un gisement énergétique de

première importance pour l'avenir ? Ce point suscite débat car il amène à poser la question de la gestion des fertilisants nécessaires pour maintenir la qualité des sols. Sans vouloir trancher dans ce débat en cours, plusieurs conclusions s'imposent :

- la première est que l'évolution de la teneur en méthane exige que des mesures soient prises dans les zones à culture intensive responsables des plus fortes émissions de méthane afin de les réduire ;
- la seconde est que ce traitement des déchets agricoles peut être intelligemment couplé à une utilisation judicieuse du biogaz généralement produit.

Nous avons déjà mentionné plus haut qu'une collecte bien organisée de déchets agricoles dans un rayon d'environ 20 km permet de faire fonctionner une unité de cogénération qui peut produire de l'électricité, de la chaleur et, éventuellement, du froid. Dans ce cas, une telle gestion des déchets, avec production d'électricité, transforme l'agriculture en un puits plutôt qu'en une source de GES (voir 5.1.1). Des analyses rigoureuses permettent de chiffrer exactement cet effet de puits de GES [10]. Pour l'instant, le traitement des déchets agricoles est très peu valorisé alors qu'il s'agit d'un gisement important très facilement mobilisable, à coût très réduit, voire même négatif. Toutefois, cela demande une sensibilisation et une formation des agriculteurs à ces nouvelles pratiques de collecte et de traitement.

Le monde agricole est ainsi voué à jouer un rôle essentiel dans la maîtrise de l'effet de serre. Nous venons de voir que le traitement des déchets agricoles doit permettre de créer des puits de GES mais n'oublions pas que nous avons déjà souligné que la biomasse, à travers les cultures énergétiques, devait jouer un rôle important et que des surfaces agricoles seraient sollicitées pour placer des composants d'ENR (fermes éoliennes, champs de capteurs solaires, etc.). Ce sont autant de possibilités pour le monde agricole de profiter d'une partie de la rente énergétique réservée pour l'instant aux producteurs de combustibles fossiles et fissiles.

Le problème du traitement des déchets se pose également pour les déchets urbains et les eaux usées qui sont également sources d'émissions de méthane. La prise de conscience de la nécessité d'un traitement de ces déchets urbains est plus avancée, du moins dans les pays les plus développés, que pour les déchets agricoles. Par exemple, dans l'Union européenne, de nombreuses déchetteries ainsi que de nombreuses stations d'épuration des eaux usées sont pourvues d'unités de traitement. Néanmoins, la valorisation énergétique n'est malheureusement pas systématique. Le biogaz ainsi produit est trop souvent brûlé

sous forme de torchères inutiles (le seul but de ces torchères est de transformer le méthane en CO₂). En brûlant le méthane ainsi produit dans une torchère, cela permet aux déchets urbains d'être neutres au point de vue des émissions de GES mais il est possible de faire beaucoup mieux en utilisant une unité de cogénération. Le problème du traitement des polluants (dioxine et autres polluants) dans les effluents exige le recours à des solutions techniques de qualité. De telles solutions existent mais, là encore, se pose le problème de la formation technique des personnels qui gèrent les centres de traitement des déchets, sans oublier l'aspect économique.

6.2 CAPTURE À LA SOURCE DES ÉMISSIONS DE DIOXYDE DE CARBONE ET SÉQUESTRATION

6.2.1 La capture du CO₂

Parmi les émissions de CO₂, certaines sont très diluées, comme les émissions occasionnées par le transport, et leur capture n'est pas envisagée pour l'instant. En revanche, il existe des émissions à fort débit pour lesquelles la capture ne pose pas de problème majeur. C'est le cas des centrales thermiques pour la production d'électricité, dont nous avons vu qu'elles représentent une part importante des émissions de CO₂ (environ 40 % des émissions en 2000). Il faut noter que la capture du CO₂ est d'autant plus facile d'un point de vue technique que sa concentration dans les gaz est élevée. Or, dans les centrales électriques conventionnelles (dites à postcombustion), la concentration en CO₂ est relativement faible (inférieure à 15 %). En revanche, cette concentration est beaucoup plus élevée dans les centrales dites à précombustion dans lesquelles un prétraitement du combustible produit de l'hydrogène et du CO₂ à forte concentration. Certains procédés industriels (usines de traitement du gaz naturel, production d'ammoniac ou d'hydrogène, etc.) produisent également des flux importants et des concentrations élevées. Il existe donc de nombreux cas pour lesquels la capture du CO₂ à la source de l'émission est possible. Ce problème est suffisamment important pour que le GIEC ait décidé de créer un groupe de travail sur le thème « capture et séquestration du carbone », qui doit rendre ses conclusions définitives en 2005.

Plusieurs techniques existent actuellement pour capturer le CO₂. La plus couramment utilisée fait appel à des solvants chimiques capables d'absorber le CO₂ (par exemple le mono-éthylamine). Dans ce procédé, le gaz d'échappement doit être préalablement refroidi et filtré, il

est ensuite envoyé dans une colonne d'absorption. Dans une seconde phase, le solvant riche en CO₂ subit un traitement thermique permettant de récupérer le gaz. Une démarche similaire utilise des adsorbants (du charbon actif) au lieu du solvant chimique. De tels procédés requièrent de l'énergie, ce qui réduit le rendement global de l'installation. Afin de limiter la pénalité énergétique du procédé, il est possible de récupérer de la chaleur non utilisée dans le système. Ce sont des domaines dans lesquels une recherche de développement est en cours dans plusieurs pays et pour lesquels on peut attendre des progrès importants dans un avenir proche. Des études de faisabilité, non seulement technique mais également économique, de tels procédés de capture ont été effectuées. Ces études montrent qu'ils entraînent un surcoût d'investissement et une baisse du rendement. Le tableau 6.2 présente des résultats intermédiaires publiés par le groupe de travail du GIEC [18].

TABLEAU 6.2 COMPARAISON DES PERFORMANCES ET DES COÛTS D'INVESTISSEMENTS DE CENTRALES AU CHARBON ET AU GAZ NATUREL AVEC ET SANS CAPTURE DU CO₂.

	Postcombustion		Précombustion	
Rendement sur PCI (%)				
Sans capture	45,6	56,2	46,3	56
Avec capture	33,0	47,2	38,3	48
Différence	12,6	9,0	8,1	8
Coût d'investissement (\$/kW_{el})				
Sans capture	1 020	410	1 470	410
Avec capture	1 860	790	2 200	910
Surcoût de la capture	830	380	730	500

PCI : pouvoir calorifique inférieur, voir annexe IV.
D'après le GIEC [18].

D'après ce tableau, on constate que le surcoût dépend fortement de la technologie de la centrale électrique. C'est ainsi que pour une centrale au gaz naturel utilisant un cycle combiné, la capture entraînerait un surcoût à l'investissement de 100 % et une réduction du rendement qui passerait de 56 % à 48 %. Pour les centrales électriques des générations futures et fonctionnant au charbon (centrales à cycles IGCC, *integrated gasification combined cycle*, ou cycles combinés avec gazéification intégrée du charbon), le surcoût d'investissement en valeur absolue est à peu près le même que pour les centrales au gaz naturel mais il est beaucoup plus faible en valeur relative (d'environ

30 %) à cause de l'investissement de base plus élevé des centrales au charbon. La baisse du rendement est également plus importante pour les centrales au charbon (de 45 % à 33 ou 38 %) suivant que le procédé de capture est postcombustion ou précombustion. Le surinvestissement et la baisse de rendement se traduiraient en définitive pour le producteur d'électricité par une augmentation du kWh_{e1} comprise entre 0,01 \$ et 0,25 \$ suivant la technologie (soit une augmentation comprise entre 45 % et 70 % par rapport aux conditions actuelles). Cette augmentation, importante si le coût du kWh_{e1} est faible, ce qui est le cas actuellement, deviendrait moins pénalisante si le coût de l'électricité était amené à augmenter.

Si l'on sait capturer le CO₂, qu'en faire ensuite ? Deux possibilités existent : sa réutilisation ou sa séquestration, que nous allons considérer maintenant.

6.2.2 La séquestration du CO₂

Il existe dans le sous-sol de nombreuses possibilités de stockage géologique du dioxyde de carbone. En premier lieu, les gisements épuisés de combustibles fossiles constituent d'importantes cavités qui peuvent accueillir du CO₂ sous pression. Il existe d'autres sites envisagés comme les nappes aquifères salines profondes ainsi que les fonds marins qui pourraient héberger des poches de CO₂.

a) Injection de CO₂ dans des gisements en fin d'exploitation ou épuisés

La technologie la plus répandue actuellement pour le stockage géologique du CO₂ consiste à injecter le gaz sous pression (150 à 200 bars environ) dans un gisement de pétrole en fin d'exploitation. Cette opération permet de récupérer le pétrole qui ne pourrait être exploité sans cette extraction assistée. En effet, dans un gisement pétrolier, on commence par extraire le pétrole le moins visqueux, mais au fur et à mesure de l'exploitation, le pétrole restant est de plus en plus visqueux, et un moyen de prolonger l'exploitation est de forcer l'extraction de ce pétrole résiduel en injectant un fluide sous pression. Ce fluide peut être du CO₂, qui est ainsi séquestré. Le bilan est positif pour l'environnement car la quantité de carbone séquestrée est supérieure à celle libérée par l'exploitation assistée. La masse volumique du CO₂ stocké est en effet d'environ 1 000 kg/m³, ce qui correspond à une quantité de carbone stockée d'environ 270 kg/m³, soit approximativement le tiers de la quantité de carbone contenue dans un mètre cube de

combustible fossile. Si donc on utilisait tous les gisements exploités pour la séquestration du carbone, on aurait la possibilité d'emprisonner environ le tiers de tout le carbone émis par l'activité humaine, ce qui est considérable.

Pour l'instant, les possibilités de stockage dans d'anciens gisements se heurtent à des résistances mineures de la part des riverains. Les craintes concernent les risques de fuites et les cas d'accidents (tremblements de terres, etc.). L'intérêt d'utiliser d'anciens gisements est que ces cavités ont prouvé qu'elles étaient hermétiques sinon le combustible fossile n'aurait pas pu y survivre pendant des millénaires, si bien que les risques de fuites sont mineurs. En revanche, les perspectives de stockage de CO₂ dans des fonds sous-marins se heurtent à des oppositions beaucoup plus fortes. Les craintes, dans ce cas, proviennent d'une part de l'inconnue sur l'échange entre ces poches de CO₂ et l'écosystème marin, et d'autre part du grave problème qui se pose : les océans ne sont pas des poubelles et la question est de savoir si on a le droit de déposer des déchets (le CO₂ en est un) dans leurs profondeurs.

À l'heure actuelle, plusieurs gisements sont ainsi utilisés pour séquestrer du CO₂. Ces opérations ont été entreprises moins dans le but de la séquestration que pour promouvoir la récupération assistée du pétrole. C'est ainsi qu'il existe, aux États-Unis, plus de 3 000 km de gazoduc au CO₂ avec une capacité de distribution de 45 Mt/an de gaz à destination des gisements pétroliers proches de l'épuisement.

b) Injection de CO₂ dans des nappes aquifères salines profondes

Les nappes aquifères salines profondes ont également été identifiées comme des réservoirs possibles pour la séquestration du CO₂. En effet, suite à son injection sous pression dans la nappe, le CO₂ est absorbé par la solution saline et réagit avec les sels qu'elle contient pour former des carbonates, ce qui constitue une solution idéale pour séquestrer le CO₂ de façon permanente. La solution saline se trouve généralement dans un milieu poreux ; pour que l'injection s'effectue dans de bonnes conditions, il est souhaitable qu'il le soit suffisamment tout en étant recouvert par un milieu qui le soit moins, afin d'éviter les fuites de CO₂. Enfin, l'eau de ces nappes aquifères doit nécessairement être riche en calcium, magnésium ou fer, qui favoriseront la formation de carbonates.

Cette technologie est moins avancée que celle d'injection dans des puits en extinction, néanmoins plusieurs expériences d'injection de CO₂ dans des nappes existent, la plus connue étant celle de Sleipner en

Norvège. Il s'agit d'un forage de gaz naturel offshore qui produit un mélange de gaz naturel et de CO₂. Le CO₂ est séparé du gaz naturel et au lieu d'être rejeté dans l'atmosphère, il est injecté dans une nappe aquifère saline située à 1 000 m sous le fond de la mer à raison de 1 Mt de CO₂ par an depuis octobre 1996. Le bilan de cette expérience pilote soutenue par la Commission européenne permettra très rapidement de fixer des perspectives réalistes à cette nouvelle technologie très prometteuse de séquestration. Ceci permettra de proposer des chiffres avec une fourchette plus réduite que celle présentée dans le tableau 6.3, et d'en savoir un peu plus sur le potentiel de séquestration de cette technologie.

c) Bilan des perspectives de séquestration du CO₂

Des études poussées sur les possibilités de séquestration à proximité des centres à forte consommation énergétique (côte est des États-Unis par exemple) ont été effectuées pour évaluer le potentiel de ces technologies de séquestration du CO₂. C'est ainsi que l'AIE a estimé les capacités de stockage dans les réservoirs géologiques (à l'exclusion des fonds sous-marins et dans les limites d'un coût d'injection inférieur à 20 \$ la tonne de CO₂). Le tableau 6.3 présente ces estimations et les compare aux émissions cumulées prévues d'ici 2050 d'après le scénario de référence du GIEC (scénario BUA, *business as usual*). La grande incertitude concernant les possibilités dans les nappes salines profondes sera bientôt levée avec le retour des expériences en cours.

TABLEAU 6.3 CAPACITÉS DE STOCKAGE SUIVANT LES TYPES DE RÉSERVOIRS ET COMPARAISON AUX ÉMISSIONS PRÉVUES D'ICI 2050.

Type de stockage	Gt CO ₂	% des émissions d'ici 2050
Gisements de gaz épuisés	690	34
Gisements de pétroles épuisés	120	6
Gisements aquifères salins	400 à 10 000	20 à 500
Mines de charbon	40	2

Source : GIEC [18].

On constate, sans prendre en compte les gisements aquifères, que ce sont environ 40 % des émissions qui pourraient être séquestrées. En tenant compte des gisements aquifères salins, c'est la totalité des émissions qui pourrait vraisemblablement être séquestrée.

Ce scénario d'un recours intensif à la séquestration peut paraître très futuriste, néanmoins, à l'heure actuelle, un lobby important en faveur de ce scénario se développe et, comme nous l'avons dit plus haut, le GIEC vient de créer un groupe de travail sur ce thème. La raison pour laquelle cette perspective semble attractive tient au fait que les années glorieuses du pétrole touchent à leur fin et que le gaz naturel voit également ses années comptées. Le charbon semble donc être le combustible fossile de l'avenir mais c'est aussi celui qui entraîne la plus forte émission de CO₂ par kilowattheure produit (tableau 4.3). Dans ces conditions, de nombreux experts en énergie sont convaincus que lorsque les gisements de pétrole et de gaz arriveront à épuisement, la teneur en CO₂ dans l'atmosphère sera tellement élevée que la condition pour pouvoir continuer à exploiter le charbon sera de capturer et séquestrer le CO₂. Des cycles IGCC seraient utilisés. Ces cycles, à fort rendement, produisent de l'hydrogène et permettent la capture du CO₂ dans des conditions favorables car le gaz est alors fortement concentré¹. Une telle centrale électrique serait reliée à deux réseaux de gazoducs, destinés l'un à transporter le CO₂ vers le lieu de séquestration, l'autre l'hydrogène vers ses lieux d'utilisation. Cette technologie offrirait ainsi l'avantage de produire de l'hydrogène sans émission de CO₂. Certains experts voient dans cette filière une des solutions d'avenir pour maîtriser l'effet de serre.

Les États-Unis et l'Europe maîtrisent les techniques de capture et de séquestration du CO₂. Des progrès restent à faire mais la faisabilité technique est prouvée de même que la faisabilité économique dans le cas de l'extraction assistée du pétrole. C'est sans aucun doute un domaine où de nombreuses recherches de développement et de démonstration restent à effectuer dans les années à venir. Il est cependant probable que l'on assistera à une dissémination importante de ces techniques bien avant 2050. Ce serait par exemple une des possibilités dont disposeront les États-Unis pour limiter de façon radicale leurs émissions si les conséquences de l'effet de serre devenaient insupportables. Il faut observer que si ces techniques de capture et de séquestration sont appliquées à des centrales électriques utilisant du biogaz ou des biocarburants, on réalise de fait des puits de CO₂. Et la capture et la séquestration couplées à des unités de cogénération

1. Dans les cycles IGCC, le CO₂ est formé au moment de la production de l'hydrogène et avant la combustion de celui-ci alors que dans un cycle conventionnel le CO₂ est émis au cours de la combustion : sa concentration est alors plus faible en raison de la présence d'air, et donc sa capture plus délicate.

fonctionnant au biogaz permettraient de constituer des puits encore plus importants. En cas de nécessité extrême, c'est une possibilité qui pourrait être exploitée.

6.2.3 La réutilisation du CO₂

Le CO₂ est d'ores et déjà utilisé dans un certain nombre d'applications : agroalimentaire, boissons gazeuses, traitement de l'eau, chimie, soudure, etc. Aux États-Unis, hors l'utilisation dans l'exploitation pétrolière, la consommation de CO₂ atteint 7 Mt/an en 2001 et il est prévu qu'elle atteigne 11 Mt/an en 2011. Cette consommation est en augmentation à l'échelle mondiale, notamment à cause du marché des boissons gazeuses qui est en pleine expansion. Pour importante qu'elle soit, elle est encore marginale par rapport aux émissions : c'est ainsi qu'aux États-Unis la consommation de CO₂ représente seulement 0,5 % des émissions. La tonne de CO₂ se négocie aux environs de 50 \$ et actuellement la demande est supérieure à l'offre, si bien qu'il existe bien un espace, toutefois réduit, pour une réutilisation du CO₂.

À côté de ces applications conventionnelles, il est possible d'en envisager de nouvelles. C'est ainsi que des études suggèrent d'utiliser le CO₂ dans le secteur de la chimie pour des synthèses de méthane, de méthanol ou d'autres composés. Des recherches sont encore nécessaires dans ces domaines pour mettre au point des procédés qui représentent de façon certaine un intérêt pour l'environnement. Un autre domaine où le CO₂ pourrait percer est celui de la réfrigération. En effet, les fluides frigorigènes halogénés (HFC), les plus utilisés actuellement, sont des fluides qui contribuent fortement à l'effet de serre. Le CO₂ est l'un des fluides alternatifs les plus prometteurs, que ce soit pour la climatisation automobile, le froid industriel, ou les pompes à chaleur. Si le CO₂ s'imposait comme l'un des fluides frigorigènes majeurs, cela représenterait un débouché intéressant. Enfin, les possibilités de réutilisation du CO₂ dans des serres sous atmosphère contrôlée constituent une autre possibilité prometteuse. Néanmoins, dans le contexte actuel, sauf percée imprévue, la réutilisation du CO₂, pour intéressante qu'elle soit, ne sera que marginale par rapport aux émissions et au potentiel de la séquestration.

6.2.4 Conclusion sur les puits de CO₂

Les puits de CO₂ seront-ils capables en 2030 d'absorber les émissions de CO₂ correspondant aux 200 Mtep de combustibles fossiles excédentaires par rapport à la consommation de 2000 ? Pour cela, ce sont

environ 700 Mt de CO₂ qui devraient être capturés par la biosphère ou séquestrés. À l'heure actuelle, ce sont environ 50 Mt de CO₂ qui sont séquestrés par an pour la récupération assistée de pétrole. Disséminer ces techniques aux États-Unis et en Europe (c'est-à-dire près de sources importantes de CO₂) pour séquestrer quelques centaines de mégatonnes de CO₂ dans des gisements épuisés paraît possible à l'échéance de 2030. Par ailleurs, si des politiques de reboisement se développaient, cela entraînerait une augmentation du stock de carbone dans la biosphère. Dans ces conditions, l'objectif d'éviter l'émission de 700 Mt de CO₂ grâce à la capture conjuguée au stockage ou à la séquestration semble être un objectif envisageable dès 2030. Mais cela exigera une politique volontariste avec des incitations.

La conjonction de l'utilisation rationnelle de l'énergie, du développement des ENR (essentiellement la biomasse et l'éolienne), et enfin des puits de CO₂ devrait permettre en 2030 de limiter la consommation d'énergie fossile au niveau de 2000. Cet objectif atteint, d'après les modèles développés par le GIEC, la teneur en CO₂ devrait pouvoir être limitée à environ 550 ppm, et le réchauffement planétaire pourrait ainsi être inférieur à 1,5 °C et ses effets limités. Ceci ne devrait toutefois être qu'une étape vers l'utilisation plus importante des ENR. Le stade suivant consisterait à développer l'énergie solaire, notamment par l'installation de centrales solaires thermodynamiques dans les déserts proches des zones urbanisées (la Californie est à cet égard un bon exemple, mais également les régions africaines proches du Sahara ou l'Australie) et par l'intégration du photovoltaïque dans l'habitat. Le développement intensif des ENR provoquerait un forçage radiatif négatif (annexe I) qui permettrait de compenser partiellement le forçage radiatif positif dû à la teneur élevée en CO₂ et d'atteindre un nouveau régime permanent. On aurait ainsi un nouvel équilibre climatique sans risque de dérive. Dans le cas, fort improbable, où dans un avenir lointain le forçage radiatif négatif dû à l'utilisation intensive des ENR entraînerait un refroidissement planétaire, il serait alors possible de déstocker une partie du CO₂ séquestré !

Chapitre 7

Le surcoût de la lutte contre l'effet de serre

L'auteur n'étant pas économiste, ce chapitre ne prétend pas présenter un modèle pour une économie dans laquelle l'effet de serre serait maîtrisé. Néanmoins, dans la mesure où les décideurs ne peuvent pas ignorer le problème du surcoût de certains équipements de lutte contre l'effet de serre, ce problème se doit d'être abordé dans un tel ouvrage.

D'abord, il est important d'insister à nouveau sur le fait que de nombreuses initiatives permettant de réduire la consommation d'énergie (et donc les émissions de dioxyde de carbone) ont été prises car elles sont à coût négatif, se traduisant tout simplement par des économies. C'est la raison pour laquelle, depuis la première crise pétrolière de 1973, de grands progrès ont été réalisés, principalement dans l'industrie, pour réduire la consommation d'énergie. Cela participe à la réduction des coûts de production et une entreprise qui néglige cette démarche risque d'être devancée par ses concurrentes. Cette réduction de la consommation, pilotée par l'économie susceptible d'être réalisée, est d'autant plus importante que le prix de l'énergie est élevé. De fait, la forte réduction de la consommation énergétique dans les procédés industriels a suivi l'envolée des cours des produits pétroliers en 1973. De même un automobiliste européen est amené à être beaucoup plus vigilant sur la consommation du véhicule qu'il achète qu'un

Américain car pour lui le prix du carburant est bien plus élevé. Les économies d'énergie sont en fait proportionnelles aux coûts des énergies fossiles. Peut-on en conséquence estimer quel devrait être le coût des énergies fossiles pour qu'un équilibre naturel de la consommation permette de maîtriser l'effet de serre ?

7.1 COÛT DES COMBUSTIBLES FOSSILES POUR LA MAÎTRISE DE L'EFFET DE SERRE

Nous allons considérer que le coût du baril de pétrole est la somme du prix de vente à la production (incluant le coût de production plus les bénéfices, ou ce que nous appelons la rente pétrolière) plus le coût du traitement du CO₂ émis lors de la combustion. Considérons l'utilisation d'un baril de pétrole à 30 \$, ce qui correspond au prix d'une tep d'environ 200 \$. Cette tep (assimilée à une tep d'octane) va dégager environ 3,5 t de CO₂ (annexe IV et [15]). Le coût de la tonne de carbone évitée est généralement évalué à 100 \$, soit 27 \$ pour la tonne de CO₂ évitée [8]. Si, avec le principe pollueur-payeur, on impose au consommateur d'une tep de combustible fossile de payer l'intégralité du coût de traitement des 3,5 t de CO₂ qu'il émet, il sera donc taxé d'un peu moins de 100 \$. Un coût de 300 \$ la tep permettrait ainsi d'intégrer la taxe pour lutter contre l'effet de serre. Si elle était intégralement répercutée au consommateur, une telle taxe appliquée à l'essence entraînerait une hausse, hors autres taxes, du prix à la pompe de l'ordre de 50 %. En Europe, où l'essence est déjà fortement taxée, la hausse nette serait inférieure à 10 % et dépendrait des pays selon leurs propres taxes. Néanmoins, nous verrons dans le paragraphe suivant qu'il n'est pas nécessaire de répercuter sur le consommateur l'intégralité de cette hausse.

Dans son ouvrage *Combattre l'effet de serre nous mettra-t-il sur la paille ?* [8], l'économiste Roger Guesnerie démontre que pour « un Américain moyen qui émet 6 tonnes de carbone dans l'atmosphère chaque année, le Protocole de Kyoto lui imposerait une réduction d'environ 1,5 t, soit un coût d'environ 150 \$ par an. Comme son revenu est de l'ordre de 35 000 \$ par an, le coût, en pourcentage du revenu annuel, est de l'ordre de moins de 0,5 % ». Le coût de la lutte contre l'effet de serre impliquée par le Protocole de Kyoto est donc, somme toute, assez modique. Cependant, une lutte efficace contre l'effet de serre coûterait plus cher qu'une simple application du Protocole de Kyoto, mais l'ordre de grandeur que nous venons de mentionner nous

indique que cela n'imposerait pas de multiplier par dix le prix des énergies fossiles, loin s'en faut. Il suffirait, au maximum, de les augmenter de 10 à 25 % comme nous venons de le voir pour l'essence. L'augmentation pourrait même être encore plus faible car, comme nous l'avons déjà dit, de nombreuses économies d'énergie seront à coût nul dès que le prix de l'énergie augmentera, même légèrement, et dans le même temps certaines ENR deviendront rapidement compétitives, ce qui freinera le renchérissement des cours des combustibles fossiles.

7.2 QUI DOIT PAYER LA LUTTE CONTRE L'EFFET DE SERRE ?

Nous venons de voir que si le coût de la tonne de carbone évitée était de 100 \$, une taxe d'un peu moins de 100 \$ sur la tep permettrait de régler le problème de l'effet de serre. Qui devrait payer cette taxe ?

La première idée est de dire qu'une écotaxe de 100 \$ la tep (soit environ 15 \$ le baril de pétrole) appliquée à la source (principe du pollueur-payeur) résoudrait le problème. Une seconde idée vient de l'observation que l'évolution des cours des hydrocarbures montre qu'ils ne dépendent pas des coûts d'extraction mais de la pression de la demande. Une augmentation de la consommation d'énergie fossile entraîne inexorablement une hausse des cours des produits pétroliers, et donc une augmentation de la rente pétrolière sans aucune augmentation de prestation. Nous allons maintenant nous appliquer à démontrer qu'une politique volontariste couplée à une taxation adéquate doit permettre de faire payer aux producteurs de combustibles fossiles la lutte contre l'effet de serre.

Pour cela, nous allons d'abord considérer le scénario de base de consommation d'énergie (d'ici 2030) prédit par l'AIE. Ceci nous permettra d'estimer la facture (facture de référence) payée aux producteurs de combustibles fossiles, en supposant que le coût du baril de pétrole reste élevé, aux environs de la référence de l'AIE (200 \$ la tep, soit environ 30 \$ le baril). Ensuite, nous considérerons notre scénario économe en énergie fossile. Nous supposerons que grâce à la forte réduction de consommation d'hydrocarbures les cours du pétrole seront inférieurs de 20 % à ceux du cas de référence. Nous en déduisons la nouvelle facture (facture alternative) payée aux producteurs d'énergie fossile. Cette facture est fortement diminuée (voir tableau 7.1) pour deux raisons : diminution de la consommation et diminution des cours.

Supposant que globalement le coût pour l'ensemble de la société est le même dans les deux scénarios, la différence entre les deux factures nous donne le montant que la société peut allouer aux économies d'énergie et aux énergies alternatives. Les résultats de cette simulation sont présentés dans le tableau 7.1.

TABLEAU 7.1 ÉVALUATION DU COÛT ÉNERGÉTIQUE
SOUS CONTRAINTE ENVIRONNEMENTALE.

	AIE (2000)	AIE (2030)	Alternative (2030)	Différence AIE-Alternative
Consommation de combustibles fossiles (Mtep)	8 044	13 578	8 044	5 534
Émissions de CO ₂ (Mt)	22 639	38 161	22 639	15 522
Coût des combustibles fossiles (milliards de \$)	1 286	2 715	1 608	1 107
Coût de l'excédent CO ₂ (milliards de \$)	0	419	0	419
Différence de coût totale				1 526

Ces résultats font apparaître qu'avec le scénario de référence de l'AIE, la rente des producteurs de combustibles fossiles fait plus que doubler entre 2000 et 2030. Nous avons supposé la tep à 200 \$ (soit environ 30 \$ le baril) ; l'augmentation pourrait même être plus forte si le cours du baril continuait de flamber sous la pression de la demande. Un tel scénario conduirait à un épuisement rapide des combustibles fossiles accompagné d'une rente pétrolière démesurée. Notre scénario plafonne quant à lui la consommation d'énergie fossile, et les revenus des producteurs de combustibles fossiles restent constants entre 2000 et 2030 car nous supposons que la stabilisation de la demande permet de maintenir les cours du baril de pétrole en 2030 à sa valeur de 2000 (24 \$ en moyenne, contre 30 \$ pour le scénario AIE 2030). Les revenus des producteurs de combustibles fossiles en 2030 sont alors réduits de 40 % avec notre scénario par rapport au scénario AIE. La différence du coût global des combustibles fossiles en 2030 entre les deux scénarios est importante puisqu'il atteint 1 107 milliards de \$. En supposant qu'à l'échelle planétaire le fonctionnement de la société est à coût énergétique identique dans les deux scénarios, cette différence représenterait donc les revenus du secteur des économies d'énergie et des énergies alternatives. On constate qu'ils deviennent proches de ceux

des producteurs de combustibles fossiles. C'est à ce moment que l'on basculerait d'une société basée sur les combustibles fossiles vers une société basée sur les énergies alternatives.

Dans ce même tableau, nous avons porté le coût représenté par le traitement des émissions de CO₂ si, comme tout le laisse penser, les 22 639 MtCO₂ émises dans le scénario AIE étaient totalement insupportables et devraient donc être réduites à leur niveau de 2000. À 27 \$ la tonne de CO₂ évitée, cela représenterait un coût supplémentaire de 419 milliards de \$. Si l'on considère qu'en 2030, le coût pour le consommateur sera la somme du coût des combustibles plus celui du traitement du CO₂, on parvient à une différence de coût total entre le scénario AIE et notre scénario de 1 526 milliards de \$. Si le coût de l'énergie pour la société est le même, cela signifie que ce sont 1 526 milliards de \$ qui peuvent être consacrés pour financer les économies d'énergie que nous avons estimées à l'équivalent de 4 000 Mtep et la production de l'équivalent de 1 500 Mtep d'énergie non carbonée. Avec notre scénario, en 2030, le chiffre d'affaires des industries se consacrant aux économies d'énergie et aux ENR devrait donc être du même ordre de grandeur que celui de celles consacrées aux combustibles fossiles.

Nous avons insisté sur le rôle important des incitations pour les économies d'énergie. Si ce sont 200 \$ par tep évitée annuellement qui sont accordés pour cette incitation (coût d'une tep), cela signifie 800 milliards de \$ pour 40 000 tep. Sur cette somme, une part non négligeable devrait être dédiée au transfert technologique car, comme nous l'avons vu, si l'on veut que des pays comme la Chine et l'Inde puissent participer efficacement à la lutte contre l'effet de serre, il est primordial qu'ils aient accès à la technologie adaptée (notamment les centrales thermiques à haut rendement pour la production d'électricité), tout en reconnaissant les droits de propriété industrielle sans quoi on risque de bloquer l'innovation. Les autres 1 726 milliards de \$ seraient consacrés aux 1 500 Mtep d'énergie non carbonée, ce qui autoriserait la tep d'énergie non carbonée à être à 484 \$ contre 200 \$ pour la tep de combustible fossile. Dans ces conditions, la biomasse et l'énergie éolienne ne devraient avoir aucun problème pour s'imposer. Suivant notre analyse sur les ENR, environ la moitié de cette somme qui leur serait consacrée, soit environ 250 milliards de \$, irait à la biomasse. C'est dire que sur la rente énergétique, une part importante reviendrait aux agriculteurs. Près du tiers, soit de l'ordre de 150 milliards de \$, irait à l'énergie éolienne. Là encore, une petite partie de cette somme serait destinée aux agriculteurs comme droit de bail. Le reste enfin irait

aux autres ENR (dont le solaire), ainsi qu'à la capture et à la séquestration. Un tel scénario suppose évidemment le développement important de nouveaux secteurs d'activité, dont une grande partie sera une activité déconcentrée dans le monde rural. Mais, nous avons vu précédemment que de nombreuses industries sont prêtes à se développer rapidement si le marché émerge.

Le raisonnement très simple utilisé ici ne prétend pas apporter la solution économique pour parvenir à la maîtrise de l'effet de serre. Néanmoins, il tend à démontrer qu'une politique volontariste, vraisemblablement basée au départ sur une écotaxe faible des combustibles fossiles, aura mécaniquement pour effet de réduire la consommation d'énergie. Cette réduction de la consommation d'énergie freinera ainsi les cours des produits pétroliers, ce qui permettra d'augmenter l'écotaxe en limitant les revenus des producteurs mais sans pénaliser le consommateur final. De cette façon, il est possible de dégager des fonds qui peuvent être utilisés pour les économies d'énergie et pour les énergies alternatives, ce qui permet de réduire la consommation d'énergie fossile. Il s'agit de cette façon d'enclencher un cycle vertueux destiné à contenir la consommation d'énergie fossile et du même coup à maîtriser l'effet de serre. La dynamique créée par une telle politique volontariste permettra aux économies d'énergie et aux énergies alternatives de prendre tout leur essor et de préparer la société des décennies à venir. Cette dynamique sera d'autant plus facilitée que les cours du pétrole seront plus élevés que ceux prévus par l'AIE.

7.3 UN CHOIX DE SOCIÉTÉ

On se trouve placé face à un choix de société capital pour l'avenir : soit on laisse la rente pétrolière continuer à augmenter avec tous ses effets pervers, ou bien on contient cette rente pétrolière et on permet à de nouveaux secteurs de l'économie d'émerger. Cette alternative favorisera l'apparition de nouveaux métiers (y compris pour les agriculteurs) et de nouvelles entreprises. Ces nouvelles entreprises pourront profiter d'une partie de plus en plus importante de la rente énergétique. L'idée de base est qu'une gestion nouvelle de la rente énergétique combinée aux progrès techniques dans les secteurs des économies d'énergie et des énergies alternatives permettra l'émergence d'un approvisionnement énergétique, sous contrainte environnementale, totalement nouveau. Ce développement nouveau, s'effectuerait globalement à coût constant pour l'ensemble de la société et ce sont les producteurs de combustibles fossiles qui verraient leurs revenus ne pas augmenter. L'objectif

étant de réduire la pression sur les combustibles fossiles afin de réduire leurs cours ce qui permettra de dégager, grâce à une écotaxe, des produits financiers permettant la diffusion des autres technologies. On peut bien entendu s'attendre à des réactions de certains producteurs d'hydrocarbures, comme l'OPEP, pour imposer leurs prix dans la mesure où ils disposent de moyens de régulation de la production. Néanmoins, leur marge de manœuvre est limitée dans une tendance haussière. En effet, les cours élevés sont favorables aux économies d'énergie et aux ENR. Aussi longtemps que le prix du baril se cantonne à des valeurs raisonnables (moins de 35 \$), les pays producteurs peuvent sans risques limiter la baisse mais à partir du moment où ce prix dépasse les 40 \$, les économies d'énergie et les énergies alternatives deviennent compétitives sans besoin d'aucune aide ni de taxation préférentielle.

Ce choix de société impliquerait un virage particulièrement important pour le pays le plus gros consommateur d'énergie fossile et le plus gros émetteur de CO₂, à savoir les États-Unis. En effet, dans ce pays, des mesures très simples pourraient être prises qui auraient des conséquences importantes pour l'ensemble de la planète. C'est ainsi qu'une augmentation légère de l'essence à la pompe (5 % par exemple) inciterait le consommateur américain à réduire sa consommation pour les transports alors qu'au contraire, le scénario de référence de l'AIE suppose qu'en 2030 un Américain consommera, pour les transports, 7,16 tep/hab contre 6,09 tep/hab en 2000, soit une augmentation de 17 %. Dans notre scénario, nous avons supposé que la consommation pour les transports de l'américain était réduite de 20 %, suite à une augmentation du prix de l'essence (écotaxe) et au progrès technique. Les produits de cette écotaxe pourraient être utilisés d'une part pour promouvoir des modèles automobiles à faible consommation (petits modèles, moteurs hybrides, piles à combustibles, etc.) et les biocarburants. De même, une légère augmentation du coût de l'énergie fossile incitera les industriels à développer des procédés économes en énergie et à y intégrer des énergies alternatives (cogénération, pompes à chaleur, ENR, etc.). Une autre mesure pour faciliter la pénétration de procédés économes en énergie pourrait être l'introduction de règles de bonus/malus. L'idée proposée en France par le ministère de l'écologie d'un bonus/malus pour l'automobile serait une bonne solution si elle était appliquée à grande échelle. Avec cette mesure, les véhicules émettant moins de 140 gCO₂/km bénéficieraient d'un bonus à l'achat alors qu'à l'inverse, les véhicules émettant plus de 180 g seraient pénalisés par un malus proportionnel aux émissions. L'opération serait blanche pour le citoyen et ne toucherait que les acheteurs de véhicules.

Il est utile d'indiquer que l'Union européenne a pris des mesures (directives favorables aux économies d'énergie, notamment dans les transports, ainsi qu'au développement des ENR) qui vont totalement dans la direction suggérée dans ce paragraphe. C'est ainsi que certains pays européens comme l'Allemagne, s'appuyant sur ces directives, adoptent des politiques tarifaires et de défiscalisation des ENR qui reviennent, de fait, à faire payer aux consommateurs une écotaxe. De plus, certains ministres européens ont, lors d'une conférence en janvier 2004, exprimé leur volonté de demander à l'Union européenne de viser à l'horizon 2020 une contribution de 20 % des ENR dans la consommation d'énergie. Une telle décision d'abord prise par l'Union européenne, puis suivie par le Japon, et reprise ensuite par les États-Unis permettrait d'atteindre les objectifs de l'alternative décrite dans cet ouvrage et permettrait la prise en charge du surcoût par les producteurs de combustibles fossiles.

À l'échelle planétaire, les agriculteurs profiteront de cette écotaxe à plusieurs niveaux :

- le développement des cultures énergétiques dans les pays les plus développés sera une ressource pour les agriculteurs de ces pays et cela devrait affaiblir la concurrence entre agriculteurs des pays développés et agriculteurs dans les PED ;
- la valorisation des déchets agricoles pour produire du biogaz représentera un revenu supplémentaire pour les agriculteurs et permettra la création d'emplois dans les agglomérations rurales de taille moyenne ;
- l'hébergement, sur des terres agricoles, de composants (fermes éoliennes, champs de capteurs solaires, etc.) constituera une rente foncière nouvelle pour les agriculteurs.

En clair, une partie de la rente pétrolière devrait être transférée vers le monde rural en général et vers les agriculteurs en particulier car le développement des ENR dépend en bonne partie de ce secteur.

Conclusion : vers quel avenir énergétique ?

Compte tenu des chapitres précédents, nous allons dégager ce que serait un avenir correspondant à une domestication de l'effet de serre. Nous le ferons en rappelant d'abord l'origine de la problématique.

Il est maintenant avéré que l'activité humaine entraîne un dérèglement climatique aux multiples conséquences, pour la plupart très lourdes pour l'avenir de notre planète. Le mécanisme est le suivant :

- l'activité humaine produit un effet de serre dû au forçage radiatif positif bien identifié de certains gaz qu'elle émet (les GES : CO₂, CH₄, NO_x, etc.) ;
- cet effet de serre crée un déséquilibre énergétique entre l'énergie solaire incidente et l'énergie infrarouge réémise ;
- ce déséquilibre énergétique engendre un excès d'énergie à la surface de la terre ;
- cet excès d'énergie enfin a plusieurs conséquences : réchauffement planétaire, fonte des glaces, élévation du niveau des mers et des océans, déplacement des isothermes à la surface de la terre, et donc modification des équilibres des écosystèmes (menaces sur la biodiversité), intensification des tempêtes et cyclones, etc.

Pour l'instant, ces effets sont encore très faibles, parfois à la limite de l'observable. Rien ne justifierait de s'inquiéter si les prévisions de consommation d'énergie et des émissions de GES associées n'apportaient

les climatologues à prédire des conséquences dramatiques à échéance de quelques décennies au cas où l'on continuerait à utiliser les combustibles comme on le fait actuellement. De plus, toute catastrophe climatique est attribuée, parfois à tort, à l'effet de serre par les médias, ce qui crée un sentiment d'angoisse collective.

Dans ces conditions, il apparaît indispensable d'entamer dès à présent un processus radical pour domestiquer cet effet de serre.

En ce qui concerne l'énergie, nous sommes aujourd'hui dans une situation analogue à celle dans laquelle se trouvait l'homme préhistorique dans son rapport à l'alimentation : il pratiquait la cueillette et la chasse sans se poser la question du renouvellement des ressources. Compte tenu de l'augmentation de la population, peut-on imaginer ce qui serait advenu de l'humanité si l'homme n'avait pas développé l'agriculture et l'élevage pour assurer la pérennité de son alimentation ? La pratique actuelle pour l'énergie est similaire : l'homme prélève les combustibles fossiles sans se préoccuper de leur renouvellement, tout en sachant que cette exploitation ne pourra durer qu'un temps (même si ce temps est long de quelques siècles).

Il s'agit maintenant dans le domaine de l'énergie d'entreprendre une démarche de domestication similaire à celle qui a été entreprise dans la préhistoire avec l'agriculture et l'élevage. Ceci est possible dans la mesure où d'une part l'homme dispose de tout un arsenal de solutions techniques qui peuvent être mises en œuvre, et où d'autre part l'effet de serre génère, à la surface de la terre, un excès d'énergie que l'homme peut tout à fait mettre à profit pour satisfaire ses besoins en énergie.

Si une stratégie de développement intensif des économies d'énergie ainsi que des énergies renouvelables est poursuivie, des résultats importants seront atteints.

Dans cet effort de domestication de l'énergie, la première mesure à prendre serait de cesser le gaspillage en impulsant une politique d'utilisation rationnelle de l'énergie. Cette démarche, que nous avons largement commentée, permettrait de faire des économies importantes d'énergie primaire dans les différents domaines de consommation de l'énergie, à savoir la production d'électricité, les transports ainsi que l'industrie et l'habitat. Il faut, par exemple, que cesse le gâchis d'énergie qui consiste, comme c'est le cas actuellement, à produire de l'électricité à partir de cycles à faible rendement et sans valorisation de la chaleur rejetée alors que des solutions techniques beaucoup plus performantes existent. De même, pour les transports, la réduction drastique des émissions techniquement maîtrisée doit se généraliser. Des mesures

originales de transports (transports en commun, covoiturage) ou tendant à limiter les déplacements inutiles (télétravail, vidéoconférences, etc.) doivent être trouvées. Dans l'industrie et l'habitat, une meilleure gestion de la chaleur (normes Haute qualité environnementale, pompes à chaleur, chauffage urbain *via* la cogénération) permettrait également des économies d'énergie.

Néanmoins, aussi loin que puissent aller ces politiques d'économies, notre société industrielle, de services et de loisirs a besoin d'énergie, et l'on voit mal ce qui pourrait, à l'échelle planétaire, pousser à réduire la consommation d'énergie pour revenir à celle de l'ère préindustrielle. Si cette énergie était fournie uniquement à partir de combustibles fossiles, tous les modèles amènent à conclure que l'effet de serre ne serait pas maîtrisé et qu'un avenir des plus sombres, avec des catastrophes climatiques en série, nous attendrait. C'est pourquoi, parallèlement à la démarche d'utilisation rationnelle de l'énergie, il faudra développer d'autres formes d'énergie non génératrices de gaz à effet de serre.

A priori, compte tenu de l'état de l'art en la matière, deux types d'énergies alternatives sont possibles : le nucléaire et les énergies renouvelables.

L'énergie nucléaire présente des avantages : elle ne contribue pas à l'effet de serre et elle est actuellement bien maîtrisée (notamment par la filière française, qui jouit d'une grande expérience et d'une grande fiabilité). Néanmoins, elle présente de nombreux inconvénients : la production d'électricité passe par une production intermédiaire de chaleur avec un faible rendement thermodynamique ; son coût d'investissement est élevé ; elle est mal adaptée aux pics de consommation ; les ressources de combustibles fissiles sont limitées (ce n'est donc pas une énergie renouvelable) ; l'évolution de son coût de fonctionnement est incertaine ; sans oublier enfin l'épouvantail que représentent les questions relatives à la sûreté, aux déchets et au démantèlement. Bref, elle ne participe pas au développement durable. Ces différents inconvénients font qu'à l'heure actuelle la dynamique n'est pas en faveur d'un développement massif de l'électronucléaire pour résoudre les problèmes liés à l'effet de serre. Cependant, il n'est pas impossible qu'à plus long terme la situation change : le fort *a priori* antinucléaire peut s'estomper si des réponses positives sont apportées aux différents inquiétudes qu'il soulève et si les pays émergents décident d'investir massivement dans le nucléaire en développant une démarche qualité (compte tenu des commandes actuelles et en négociation des centrales nucléaires par la Chine, l'énergie nucléaire devrait représenter environ

4 % de la consommation d'énergie chinoise en 2020). Mais, encore une fois, ce n'est pas la tendance actuelle.

Les énergies renouvelables présentent, de leur côté, des inconvénients : ce sont des énergies diluées et, la plupart du temps, aléatoires. Néanmoins elles sont renouvelables, ne contribuent pas à l'effet de serre et participent au développement durable. Enfin, avantage considérable et exceptionnel, ces énergies renouvelables produisent un forçage négatif qui peut compenser le forçage radiatif positif de l'effet de serre. Autrement dit, l'utilisation des énergies renouvelables permet de valoriser l'excès d'énergie produit par l'effet de serre résultant de l'utilisation des combustibles fossiles. En effet, il a été démontré que l'utilisation massive et exclusive des énergies renouvelables pour satisfaire tous les besoins de l'humanité entraînerait un refroidissement planétaire (annexe I). Cet effet est déterminant, car c'est grâce à lui qu'il peut être affirmé que l'effet de serre n'est pas irréversible. Une utilisation massive des énergies renouvelables complétée par une utilisation raisonnable de combustibles fossiles peut permettre d'atteindre un nouvel équilibre dans lequel le forçage négatif des énergies renouvelables compensera exactement le forçage radiatif des combustibles fossiles.

Dans le contexte actuel où la médiatisation de l'effet de serre conduit à un pessimisme et à un fatalisme démobilisateur, on se doit d'affirmer haut et fort que l'effet de serre n'est absolument pas une fatalité dramatique. Au contraire, l'effet de serre est un signal utile qui permet de détecter qu'il y a, actuellement, une utilisation abusive de combustibles fossiles.

Si nous faisons l'hypothèse que les mesures appropriées d'utilisation rationnelle de l'énergie et d'utilisation des énergies renouvelables que nous venons de souligner sont mises en place progressivement, l'avenir énergétique et climatique de notre planète comportera plusieurs phases :

- dans un premier temps, l'utilisation rationnelle de l'énergie, combinée à une utilisation modérée des énergies renouvelables, permettra de contenir la teneur en GES à des niveaux acceptables (de l'ordre de 550 ppmv, soit un doublement par rapport à l'ère préindustrielle). Durant cette période (d'ici à 2030-2050), malgré ces mesures, les émissions de GES n'auront certainement pas été plafonnées et il faudra vraisemblablement capturer puis séquestrer du CO₂ dans d'anciens gisements d'hydrocarbures ou de charbon ;
- ensuite, lorsque le développement de l'appareil de production industrielle des énergies renouvelables aura atteint sa maturité, on atteindra une maîtrise parfaite de l'effet de serre pour maintenir la

température de la terre à une valeur légèrement supérieure à celle qui prévalait avant l'ère industrielle. Ceci exigera la combinaison d'une utilisation raisonnable des combustibles fossiles avec une utilisation rationnelle de l'énergie et un recours intensif aux énergies renouvelables. Compte tenu de la tendance actuelle, un échauffement de l'ordre de 1 à 1,5 °C semble malgré tout inévitable. Le niveau de réchauffement planétaire dépendra des efforts consentis pour le développement des économies d'énergie et des énergies renouvelables. Le prix à payer sera d'autant plus élevé que l'on prendra tardivement les mesures préventives et que l'on voudra contenir fortement le réchauffement. Il s'agira là bien d'un choix de société qui donnera, sans aucun doute, lieu à de nombreux débats ;

- ultérieurement, si la consommation des énergies renouvelables croît suffisamment, on peut envisager, dans une troisième phase, un refroidissement planétaire, ce qui permettra à la température de décroître pour se rapprocher de sa valeur préindustrielle ;
- enfin, dans un avenir encore plus lointain, si la consommation des énergies renouvelables devenait tellement importante que la température de la terre descendait en dessous de la valeur préindustrielle, il serait toujours possible, dans une quatrième phase, de libérer le CO₂ séquestré durant la première phase.

Le nouvel équilibre auquel parviendra notre société industrielle à forte consommation énergétique sera nécessairement différent de celui qui existait dans la société préindustrielle quand elle était quasi nulle. Pour parvenir à un équilibre, sous contrainte environnementale, et à une température de la terre proche de la valeur préindustrielle, il faudrait une teneur en GES nécessairement différente de celle de l'ère préindustrielle, et cette teneur d'équilibre dépendra des consommations des énergies renouvelables et des combustibles fossiles. Afin de contrôler la température planétaire, la société a une contrainte, les émissions de GES, qui créent un forçage radiatif positif, mais elle dispose de deux paramètres : les énergies renouvelables, qui créent un forçage négatif, et la teneur en CO₂, qui peut être modulée grâce à la séquestration et au déstockage.

Une question s'impose alors : quelles sont les énergies renouvelables qui peuvent remplir ces deux missions, fournir de l'énergie et créer un forçage négatif, et en aura-t-on suffisamment ? Pour l'instant, l'hydraulique est l'énergie renouvelable qui a prévalu, nous la mentionnons pour mémoire puisqu'il s'agit d'une énergie renouvelable conventionnelle.

Ensuite pour les nouvelles énergies renouvelables, nous avons mentionné que la biomasse et l'énergie éolienne se détachaient fortement

et présentaient toutes les deux un potentiel considérable. La biomasse est une énergie noble capable de transformer, grâce à la photosynthèse, directement l'énergie solaire en combustible carboné renouvelable. Le rendement de la photosynthèse va augmenter dans l'avenir grâce à l'effet de serre puisqu'il augmente avec la teneur en CO₂ et avec la température. Cette augmentation du rendement permettra de consacrer des surfaces croissantes aux cultures énergétiques, notamment pour produire des biocarburants pour le transport. De plus, il existe un potentiel considérable de production d'énergie au travers du traitement des déchets agricoles (*via* une filière de biogaz, qui peut ensuite alimenter des unités de trigénération qui produisent de l'électricité et de la chaleur et/ou du froid pour la climatisation par exemple). Cette filière du traitement des déchets est tout à fait exceptionnelle car elle permet de créer un puits de GES (en effet, elle évite des émissions de méthane, gaz à effet de serre vingt-trois fois plus fort que le CO₂). Grâce à cette filière de biomasse *via* le traitement des déchets (complétée par une unité de cogénération couplée à un système de production d'eau glacée à absorption), il existe une possibilité unique de climatiser tout en créant un puits de GES. Le développement de ces deux filières de biomasse (cultures énergétiques pour biocarburant d'une part et traitement des déchets agricoles pour biogaz d'autre part) va entraîner une transformation importante de nos campagnes avec une création d'emplois liés à l'énergie dans le monde rural.

La seconde nouvelle énergie renouvelable à présenter un potentiel considérable à très brève échéance est l'énergie éolienne, notamment dans sa version offshore. Ceci permet de lever les réticences de certains riverains à voir se développer de trop nombreuses fermes éoliennes sur les continents. Son fort taux de croissance actuel peut permettre à cette industrie naissante de se consolider si les politiques tarifaires nationales se maintiennent de façon cohérente.

L'énergie solaire possède, à plus long terme, un potentiel plus important que l'énergie éolienne et la biomasse car elle ne connaît pas de limites physiques. C'est ainsi qu'il « suffirait » d'un champ d'environ 250 000 km² de centrales solaires thermodynamiques pour fournir toute l'électricité dont notre planète a besoin actuellement alors que le seul Sahara représente plus de 2 millions de km² ; de plus l'utilisation de toits dans les villes pour des capteurs de production d'eau chaude (et éventuellement de climatisation) ou des panneaux photovoltaïques permettrait aux cités de se rapprocher de l'autonomie énergétique. Cependant, si, dans un proche avenir, le chauffe-eau solaire doit se développer fortement, l'électricité solaire va en revanche se développer

plus lentement car elle est encore trop onéreuse. Elle présente néanmoins un potentiel considérable pour un avenir un peu plus lointain, lorsque les besoins d'énergie renouvelable croîtront sans pouvoir être satisfaits par la biomasse et l'énergie éolienne. Le photovoltaïque se développera vraisemblablement, dans un avenir assez proche, en priorité dans les villes les plus exposées à la canicule car il permet, en liaison avec une gestion intelligente de la climatisation (rejet thermique dans le sous-sol), de limiter les pics de chaleur. Ceci constitue une nouvelle option (après celle présentée plus haut du biogaz couplé à la trigénération) de climatiser en créant un forçage négatif.

Les aspects économiques de la lutte contre l'effet de serre sont, bien entendu, déterminants.

Le développement des énergies renouvelables pouvant tout à fait régler d'un point de vue technique, en complément avec une utilisation raisonnable des combustibles fossiles, le problème de la maîtrise de l'effet de serre, la question qui reste posée est celle du coût de ces énergies. Pour l'instant, elles sont plus chères que les combustibles fossiles. Qui doit donc payer le surcoût ? Il faut d'abord rappeler que le schéma actuel qui consiste à exploiter, sans taxe particulière associée à l'impact environnemental, les combustibles fossiles conduit inexorablement à l'augmentation de la rente énergétique dont jouissent leurs producteurs, à l'épuisement des ressources bon marché et à un effet de serre non maîtrisé. Cette voie est donc vouée à l'échec à moyen terme à cause de la contrainte environnementale. Par opposition à cette réalité actuelle, nous avons développé la thèse que le recours massif aux énergies renouvelables permettrait de contenir les cours des énergies fossiles et que le financement du surcoût pourrait être effectué en transférant une partie de la rente énergétique depuis les producteurs de combustibles fossiles vers les producteurs d'énergies renouvelables (agriculteurs compris au travers d'une part de la biomasse et de la location de terres pour les énergies éolienne et solaire).

Le monde rural serait un des grands bénéficiaires de cette redistribution de la rente énergétique.

L'idée très simple est qu'en favorisant, avec des crédits-carbone par exemple, les énergies renouvelables, il serait possible de contenir l'augmentation de la consommation de combustibles fossiles ; le cours des énergies fossiles pourrait baisser légèrement (par rapport au niveau très élevé dépassant les 50 \$ le baril courant 2004) ; il serait alors possible d'introduire progressivement une écotaxe permettant de soutenir le développement des énergies renouvelables à coût constant de l'énergie pour le consommateur. À terme, lorsque l'appareil industriel

de production des énergies renouvelables aura progressé pour atteindre la production de masse, les énergies renouvelables deviendront compétitives avec les énergies fossiles (c'est déjà le cas pour la production d'éthanol au Brésil) et pourront se passer d'écotaxe ou de crédit-carbone pour s'imposer.

Pour qu'un tel schéma, qui représente un véritable défi, se déroule dans de bonnes conditions, il est essentiel que tous les pays aient accès au progrès permettant de lutter contre l'effet de serre. En effet, dans la mesure où les émissions de GES ne connaissent pas de frontière, la lutte contre l'effet de serre doit être menée au niveau planétaire. Ce qui signifie qu'il faut que les pays émergents puissent bénéficier des dernières technologies : quel intérêt à ce que l'Europe adopte des directives draconiennes de limitation des GES si dans le même temps la Chine et l'Inde s'équipent avec des matériels peu performants et à fortes émissions en GES ? Il faut, au niveau international prévoir des mécanismes de transfert technologique qui permettront à ces pays de contribuer à la lutte contre l'effet de serre tout en assurant leur développement et en respectant les droits de propriété des entreprises qui ont développé des équipements innovants et performants. Pour cela, il faudra vraisemblablement que des fonds internationaux alimentés par des écotaxes soient mobilisés et redistribués à l'échelle planétaire. Ce serait l'occasion de mettre en avant les bienfaits possibles de la mondialisation par opposition à ses méfaits si souvent invoqués.

Il est vraisemblable qu'après l'approbation du Protocole de Kyoto, puis son expiration en 2012, l'ONU, afin de satisfaire sa convention sur le changement climatique, devra élaborer une autre forme de protocole international, certainement plus contraignant que celui de Kyoto. Afin d'éviter les difficultés rencontrées pour l'adoption de ce dernier, il serait judicieux que le problème soit abordé globalement, c'est-à-dire qu'il est essentiel que ne soient pas prises en compte les seules émissions mais aussi les puits de CO₂ (végétation et séquestration) et le forçage négatif dû à l'utilisation des énergies renouvelables. De cette façon, il doit être possible de comptabiliser tous les effets négatifs pour l'effet de serre (au travers de la comptabilisation des émissions) sans négliger les efforts essentiels pour le devenir climatique consentis pour les contrer. Il faut reconnaître que le Protocole de Kyoto n'est pas un modèle dans sa façon d'effectuer les bilans et d'estimer les efforts des différents pays pour assurer le développement tout en contribuant à la maîtrise de l'effet de serre et du climat. Un protocole plus exigeant mais plus équilibré devrait pouvoir voir le jour pour gérer cette stratégie énergétique.

ANNEXES

Annexe I

Thermodynamique de l'effet de serre

I.1 ÉVALUATION DES FLUX D'ÉNERGIE À LA SURFACE DE LA TERRE

Considérons la surface de la terre comme un système thermodynamique fermé (n'échangeant pas de matière avec l'extérieur mais échangeant de l'énergie). Pour ce système thermodynamique, le premier principe s'écrit [15] :

$$\Delta E = W + Q \quad (1)$$

où ΔE est la variation totale d'énergie du système ;

W est l'énergie sous forme de travail échangée avec l'extérieur.

Dans le cas de la surface de la terre, il n'y a pas d'échange d'énergie mécanique avec l'extérieur et $W = 0$;

Q est l'énergie échangée avec l'extérieur sous forme de chaleur.

Dans l'équation (1), on compte positivement toute l'énergie qui est absorbée par la surface de la terre et négativement toute l'énergie qui est émise par la surface de la terre.

La terre reçoit l'énergie solaire, E_S , et elle émet l'énergie infrarouge, E_{IR} .

Compte tenu de ces échanges, le premier principe du système fermé s'écrit :

$$\Delta E = E_S - E_{IR} \quad (2)$$

où ΔE est la variation d'énergie totale du système terre.

1.1.1 Bilan en régime permanent

En régime permanent, l'énergie reçue par la terre est égale à l'énergie qu'elle réémet : $E_S = E_{IR}$; d'où $\Delta E = 0$. L'énergie totale de la surface de la terre est donc constante.

Pour effectuer le bilan d'énergie, il faut considérer d'une part le flux solaire reçu par la terre (Φ_S), et d'autre part le flux infrarouge émis par la surface de la planète (Φ_{IR}). Mais attention : le flux solaire n'est jamais reçu que sur une section du globe (de surface πR^2) alors que le rayonnement infrarouge est émis en permanence sur toute la surface de la terre ($4\pi R^2$). Ce facteur 4 entre les deux surfaces concernées est déterminant car cela signifie qu'un flux infrarouge peut compenser un flux solaire quatre fois plus important. Par ailleurs, l'albedo¹ a limite le rayonnement solaire qui parvient à la surface de la terre : seule la fraction $(1 - a)$ de ce flux atteint affectivement la surface de la terre, de telle sorte que le flux solaire reçu par la terre s'écrit :

$$E_S = \pi R^2 (1 - a) \Phi_S \quad (3)$$

La terre émet un flux d'énergie Φ_{IR} dans l'infrarouge. L'énergie E_{IR} , émise par toute la surface de la terre, est donnée par :

$$E_{IR} = 4\pi R^2 \Phi_{IR} \quad (4)$$

À l'équilibre, les deux valeurs sont égales, et l'on obtient :

$$E_S = \pi R^2 (1 - a) \Phi_S = E_{IR} = 4\pi R^2 \Phi_{IR}$$

soit
$$\Phi_{IR} = \frac{1 - a}{4} \Phi_S \quad (5)$$

Or
$$\Phi_{IR} = \varepsilon \sigma T^4 \quad (6)$$

où ε est l'émissivité² de la terre, σ est la constante de Planck et T la température.

1. L'albedo d'un corps correspond à l'intensité lumineuse réfléchie par ce corps. Il varie entre 0 (corps noir) et 1 (miroir parfait).

2. L'émissivité d'une surface mesure la capacité d'émission de chaleur d'un corps. Elle varie entre 0 et 1 (corps noir).

On en déduit :

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{1-a}{4} \frac{\Phi_S}{\varepsilon \sigma}} \quad (7)$$

On obtient ainsi la température d'équilibre de la terre (T_0) si l'on connaît les grandeurs Φ_S , ε et σ .

Application numérique

Sans effet de serre naturel et en prenant $\varepsilon = 1$.

Le flux solaire reçu par la surface extérieure de l'atmosphère est de $1\,400 \text{ W/m}^2$ et l'albedo de la terre est égal à $0,3$, si bien que le flux solaire qui pénètre dans l'atmosphère est environ égal à $\Phi_S \approx 1000 \text{ W/m}^2$, et si $\varepsilon = 1$:

$$T_0 = \sqrt[4]{\frac{\frac{1}{4} \times 1000}{5,64 \times 10^{-8}}} = 257,6 \text{ K} \approx -16 \text{ }^\circ\text{C}$$

Sans effet de serre naturel, la vie sur terre serait très problématique car la température moyenne serait seulement de l'ordre de $-16 \text{ }^\circ\text{C}$. En fait, un calcul exact donne une valeur de $-18 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui indique que la valeur de l'albedo est vraisemblablement légèrement supérieure à $0,3$. Cette température théorique est à comparer avec la température réelle actuelle de $+15 \text{ }^\circ\text{C}$. Cette différence s'explique par l'effet de serre naturel, grâce auquel ε est inférieur à 1 . Un tel modèle très simplifié permet ainsi de rendre compte à peu près de ce qui se passe au niveau de la surface de la terre en régime permanent et hors effet de serre additionnel introduit par l'activité humaine.

D'autre part, l'énergie solaire reçue par la terre est de l'ordre de :

$$\begin{aligned} E_S &= \pi R^2 (1-a) \Phi_S \times 365 \times 24 \\ &\approx 3,14 \times 36.10^{12} \times 365 \times 24 \text{ kWh/an} \\ &\approx 10^{15} \text{ MWh/an} \\ &\approx 86.10^6 \text{ Mtep/an} \end{aligned}$$

Si on compare aux $10\,000 \text{ Mtep}$ d'énergie annuelle consommée, on en déduit que l'énergie solaire reçue par la terre correspond à environ $8\,600$ fois l'énergie consommée. Pour importante que soit la consommation énergétique, elle est encore négligeable par rapport à l'énergie solaire reçue.

1.1.2 Bilan en régime transitoire

Si l'énergie solaire incidente et l'énergie infrarouge émise ne se compensent pas exactement, l'équation (1) entraîne qu'il y a variation de l'énergie totale à la surface de la terre.

Deux cas peuvent alors se produire :

- si l'énergie solaire incidente est inférieure à l'énergie infrarouge émise, il y aura diminution de l'énergie totale du système terre :

$$E_S - E_{IR} < 0 \Rightarrow \Delta E < 0$$

et cette diminution de l'énergie se traduirait par un abaissement de température ;

- si, au contraire, l'énergie solaire incidente est supérieure à l'énergie infrarouge émise, il y aura augmentation de l'énergie totale du système terre :

$$E_S - E_{IR} > 0 \Rightarrow \Delta E > 0$$

et c'est apparemment ce qui se produit actuellement à cause de la diminution de l'énergie infrarouge émise suite à l'effet de serre.

Mais l'énergie totale est la somme de l'énergie interne et des énergies cinétique et potentielle. L'énergie potentielle n'étant, *a priori*, pas affectée par la diminution de l'énergie infrarouge, on a donc :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c \quad (8)$$

L'augmentation de l'énergie peut se décomposer en une augmentation de l'énergie cinétique, ΔE_c (vents, etc.), et une augmentation de l'énergie interne, ΔU . Cette augmentation de l'énergie interne peut elle-même se décomposer en plusieurs termes :

- augmentation de la chaleur sensible *via* l'augmentation de température de l'atmosphère et de la surface de la terre ;
- augmentation de l'énergie interne stockée par exemple sous forme de biomasse accumulée dans la biosphère ou sous toute autre forme ;
- diminution de la masse de glace dont une partie fond.

L'effet de serre positif se traduit ainsi par une augmentation de l'énergie de notre planète. À une époque où la consommation d'énergie ne cesse de croître, cette constatation est positive. Néanmoins, le défi est que cette augmentation de l'énergie ne se traduise pas par des effets néfastes pour l'humanité, à savoir : augmentation non contrôlée de l'énergie cinétique (ce qui entraînerait des tornades, cyclones, tempêtes dévastateurs) et augmentation non contrôlée de la température. Tout l'enjeu du XXI^e siècle est donc la conversion de l'effet de serre en

énergie utile par exemple par conversion directe grâce aux énergies renouvelables (énergies solaire et éolienne) et notamment par conversion et stockage au travers de la biomasse.

I.2 LE FORÇAGE RADIATIF

I.2.1 Forçage radiatif positif lié à l'effet de serre cumulé

Depuis le début de l'ère industrielle, l'activité humaine a une influence importante sur le bilan énergétique de la terre *via* la modification de la quantité d'énergie infrarouge réémise, puisqu'une partie de cette énergie est à nouveau renvoyée vers la terre par l'atmosphère (c'est l'effet de serre). Pour chiffrer cet effet, le concept de forçage radiatif, F , correspondant à une diminution du rayonnement infrarouge, a été introduit. Ainsi, la diminution de l'énergie infrarouge émise se traduit par un forçage radiatif F tel que :

$$E_{IR} = 4\pi R^2(\Phi_{IR} - F) \quad (9)$$

ce qui modifie l'égalité des bilans énergétiques comme suit :

$$\pi R^2(1 - a)\Phi_S = 4\pi R^2(\Phi_{IR} - F)$$

et, en introduisant $\Phi = 4\Phi_{IR}$, conduit à :

$$\Phi = 4\Phi_{IR} = (1 - a)\Phi_S + 4F$$

soit, d'après la relation (6) :

$$\Phi_1 = 4\varepsilon\sigma T_1^4 = (1 - a)\Phi_S + 4F \quad (10)$$

où T_1 est la nouvelle température d'équilibre de la terre.

Par ailleurs, en l'absence de forçage radiatif, on avait :

$$\Phi_0 = (1 - a)\Phi_S = 4\varepsilon\sigma T_0^4 \quad (11)$$

où T_0 était la température d'équilibre en l'absence de forçage radiatif.

À cause du forçage radiatif positif ($F > 0$), dans l'équation (10), Φ (donc Φ_{IR}) sera supérieur à sa valeur sans forçage radiatif, et la température de la terre T_1 sera supérieure à T_0 .

Afin d'obtenir la température de la terre correspondant au nouvel équilibre, différencions l'équation bilan (11) :

$$\frac{d\Phi}{(1 - a)\Phi_S} = 4 \frac{dT}{T_0}$$

En tenant compte du fait que $\Delta\Phi = \Phi_1 - \Phi_0 = 4F$, on obtient, au premier ordre, la variation de température due au forçage :

$$\frac{dF}{(1-a)\Phi_S} = 4\frac{\Delta T}{T_0}$$

$$\text{soit :} \quad \Delta T = \frac{F}{(1-a)\Phi_S} T_0 \quad (12)$$

où ΔT représente le réchauffement planétaire dû au forçage radiatif F lié à l'activité humaine depuis le début de l'ère industrielle.

Application numérique : calcul de la variation de température avec forçage radiatif dû à l'activité humaine

Prenons $F = 2,43 \text{ W/m}^2$, ce qui correspond à la valeur supposée du forçage radiatif total entre les années 1750 et 2000 (les différentes contributions au forçage radiatif sont estimées par le GIEC à $1,46 \text{ W/m}^2$ pour le CO_2 ; $0,48 \text{ W/m}^2$ pour le méthane ; $0,34 \text{ W/m}^2$ pour les fluides halogénés et $0,15 \text{ W/m}^2$ pour le N_2O).

$$\Delta T = \frac{F}{(1-a)\Phi_S} T_0 = \frac{2,43}{1000} \times 288 = 0,7 \text{ K}$$

L'élévation de température estimée sur cette période est effectivement de l'ordre de $0,7 \text{ K}$. Ce modèle très simplifié permet de rendre compte des ordres de grandeur des variations de température.

Par ailleurs, l'excès d'énergie accumulé, depuis le début de l'ère industrielle, soit près de deux cents ans, à la surface de la terre par ce forçage radiatif est égal à :

$$\begin{aligned} \Delta E &= 4\pi R^2 F \\ &\approx 4 \times 3,14 \times 36.10^{12} \times 365 \times 24 \times 2,43 \text{ Wh} \\ &\approx 10^{13} \text{ MWh} \\ &\approx 86.10^4 \text{ Mtep} \end{aligned}$$

Ce forçage radiatif accumulé correspond à peu près à 86 fois la consommation énergétique annuelle actuelle.

Si, à cause des nouvelles émissions de GES, le forçage radiatif augmentait, cela entraînerait une augmentation proportionnelle de la température. Le forçage radiatif constitue ainsi une mesure de l'excès d'énergie mobilisable grâce à l'effet de serre.

1.2.2 Forçage radiatif négatif dû à l'utilisation des ENR

Revenons à l'équation (2), $\Delta E = E_S - E_{IR}$. Nous venons de voir que si E_{IR} diminue, cela entraîne un excès d'énergie à la surface de la terre et s'ensuit un échauffement. Inversement, si E_S diminuait, on pourrait avoir un défaut d'énergie à la surface de la terre qui pourrait entraîner un refroidissement.

Qu'est-ce qui serait susceptible de faire diminuer E_S ?

D'abord, l'énergie solaire reçue par la surface de la terre dépend de l'albedo. Si l'albedo augmente, E_S diminue, et c'est la raison pour laquelle les poussières et autres aérosols pourraient entraîner un refroidissement de la planète.

Par ailleurs, si une partie de l'énergie solaire incidente est captée puis utilisée par l'homme, c'est autant d'énergie qui n'est pas transmise à la surface de la terre. Afin d'évaluer l'impact de cet effet, dans une première approximation, nous ferons l'hypothèse très simplificatrice que toutes les ENR (énergie solaire thermique et photovoltaïque, biomasse et énergie éolienne) interviennent comme des prélèvements à la source d'énergie solaire. Dans ces conditions, on peut parler d'un forçage négatif des ENR.

La notion de forçage radiatif négatif est déjà utilisée pour plusieurs phénomènes liés à l'activité humaine, comme l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique ($-0,15 \text{ W/m}^2$) ou la diffusion d'aérosols anthropogéniques ($-0,4 \text{ W/m}^2$ pour les sulfates ; $-0,2 \text{ W/m}^2$ pour les aérosols provenant de la combustion de la biomasse). Dans le cas des aérosols provenant de la combustion des combustibles fossiles, certains provoquent un forçage positif, d'autres un forçage négatif. Nous étendons ici cette notion de forçage négatif à la captation, directe ou indirecte, de l'énergie solaire. Il est intéressant d'évaluer l'impact de ce forçage négatif pour le comparer au forçage radiatif positif évoqué plus haut.

Notons F_{ENR} le forçage négatif dû aux ENR (rapporté à la surface totale de la terre et non à la surface méridienne uniquement), et introduisons-le dans l'équation (3). On obtient :

$$E_S = \pi R^2[(1 - a)\Phi_S - 4F_{ENR}] \quad (13)$$

où $4\pi R^2 F_{ENR}$ correspond à la puissance des ENR utilisées par l'homme à la surface de la terre.

En présence du forçage radiatif positif de l'effet de serre et du forçage négatif dû aux ENR, le nouveau bilan s'écrit :

$$\Phi = 4\Phi_{IR} = (1 - a)\Phi_S + 4(F - F_{ENR}) = 4\varepsilon\sigma T^4 \quad (14)$$

et la variation de température de la terre due aux deux forçages devient :

$$\Delta T = \frac{F - F_{ENR}}{(1 - a)\Phi_S} T_0 \quad (15)$$

Compte tenu de l'équation (15), la condition pour que les deux énergies (solaire et forçage infrarouge) se compensent exactement est que :

$$F_{ENR} = F \quad (16)$$

Sachant qu'actuellement $F \approx 2,43 \text{ W/m}^2$, on prendra donc $F_{ENR} = 2,43 \text{ W/m}^2$. Avec $R = 6\,000 \text{ km}$ pour le rayon de la terre, on en déduit :

$$4\pi R^2 F_{ENR} \times 365 \times 24 \approx 96.10^{11} \text{ MWh/an} \approx 82.10^4 \text{ Mtep}$$

à comparer à une consommation annuelle d'énergie primaire estimée à environ 10^4 Mtep , soit environ $1,17.10^{11} \text{ MWh/an}$. Si la consommation d'énergie primaire passait à $40\,000 \text{ Mtep}$ en 2100, ceci correspondrait à environ 5.10^{11} MWh/an . Même si toute l'énergie consommée provenait d'ENR, le forçage radiatif négatif n'atteindrait que $1/75$ aujourd'hui et $1/15$ en 2100 du forçage radiatif positif cumulé dû à l'effet de serre actuel. Cet effet est donc faible, voire négligeable aujourd'hui, par rapport au forçage radiatif positif cumulé. Ce qui signifie qu'une utilisation intensive des ENR ne permettrait pas de compenser le forçage radiatif positif cumulé depuis le début de l'ère industrielle. Cependant, si l'on ne fixe plus l'objectif de vouloir compenser le forçage positif cumulé mais seulement de compenser le forçage radiatif additionnel dû aux émissions annuelles, la situation devient très différente.

I.3 CONDITION POUR LA MAÎTRISE DE L'EFFET DE SERRE

Considérons maintenant non plus l'élévation de température depuis le début de l'ère industrielle, mais la variation annuelle de température due au forçage total (forçage radiatif positif et forçage négatif). Pour cela nous prendrons l'année comme unité de temps. L'équation (15) s'écrit maintenant :

$$\delta T = \frac{\delta F - F_{ENR}}{(1 - a)\Phi_S} T_0 \quad (17)$$

où δT est la variation annuelle de température de la terre ;

δF est le forçage radiatif positif additionnel dû aux émissions annuelles de GES ;

F_{ENR} est le forçage négatif dû à la consommation annuelle d'ENR.

La consommation annuelle d'ENR ne doit plus être comparée au forçage radiatif cumulé mais au forçage radiatif additionnel. Compte tenu de la relation (17), la condition pour la maîtrise de l'effet de serre est que l'élévation de température soit nulle voire négative, soit :

$$F_{ENR} \geq \delta F \quad (18)$$

Or, par définition (relation (13)), la puissance des ENR est égale à $4\pi R^2 F_{ENR}$ et l'énergie annuelle des ENR est égale à :

$$E_{ENR} = 4\pi R^2 F_{ENR} \times 365 \times 24 \text{ Wh/an}$$

Le forçage radiatif peut être calculé à l'aide de la formule recommandée par le GIEC [1] :

$$\delta F = 4,37 \frac{\ln \frac{C(t)}{C_0}}{\ln 2} \approx \frac{\delta C}{C_0} \times 6,3 \text{ W/m}^2 \quad (19)$$

où $C(t)$ est la concentration en CO_2 à l'instant t considéré et C_0 la concentration pré-industrielle.

Si δC est la variation de concentration sur une année (soit environ 2,8 ppmv/an à l'heure actuelle), on obtient $\delta F = 0,06 \text{ W/m}^2$.

Compte tenu de la relation (19), la condition (18) de maîtrise de l'effet de serre s'écrit alors :

$$E_{ENR} \geq 4\pi R^2 \frac{\delta C}{C_0} \times 6,3 \times 365 \times 24 \text{ Wh/an}$$

ou
$$E_{ENR} \geq 4\pi R^2 \times \delta F \times 365 \times 24 \quad (20)$$

Actuellement, on obtient :

$$\begin{aligned} E_{ENR} &\geq 4 \times 3,14 \times 36.10^{12} \times 0,06 \times 365 \times 24 \text{ Wh} \\ &\approx 2,4.10^{11} \text{ MWh} \approx 2.10^4 \text{ Mtep} \end{aligned}$$

Compte tenu des émissions actuelles de GES, la maîtrise de l'effet de serre exigerait donc une consommation annuelle d'ENR équivalente à 20 000 Mtep, à comparer aux 450 Mtep actuelles !

Annexe II

Les cycles thermodynamiques pour la production d'électricité¹

Le rendement d'un cycle thermodynamique dépend des températures de fonctionnement du cycle. Or un cycle thermodynamique conventionnel [15] fonctionne avec une source de chaleur à haute température (T_{sc}) et une source froide de rejet thermique (T_{sf}). D'après le principe de Carnot, le rendement maximum est égal à :

$$\eta_c = 1 - \frac{T_{sf}}{T_{sc}}$$

Si les températures de la source chaude et de la source froide sont respectivement de 600 K (327 °C) et de 300 K (27 °C), le rendement maximal d'une telle machine est de 0,5. Pour une machine réelle, le rendement, dans ces conditions de température, sera de l'ordre de 0,25 à 0,35 selon la qualité de l'installation. Pour les cycles à vapeur utilisant l'eau comme fluide de travail, ce sont les valeurs typiques obtenues.

Une façon d'améliorer le rendement est d'utiliser une température de source chaude plus élevée. Si l'on utilise l'eau comme fluide de

1. Pour plus de détails, se reporter à [15], F. Meunier, *Thermodynamique de l'ingénieur*, 2004.

travail, la tendance est à fonctionner avec des cycles supercritiques mais on atteint rapidement la limite de ces cycles. La solution la plus efficace consiste à utiliser un cycle combiné. Dans ce cas, deux cycles thermodynamiques sont utilisés en cascade. Un cycle à air est utilisé dans l'étage haute température de la cascade et un cycle à vapeur est utilisé dans l'étage basse température de la cascade. Typiquement, on dispose d'une source chaude (résultant, par exemple, de la combustion) à température élevée ($\approx 1\,200\text{ K}$ ou $927\text{ }^\circ\text{C}$) et d'un rejet thermique toujours vers 300 K ($27\text{ }^\circ\text{C}$). Le rendement de Carnot d'un tel cycle est alors égal à 0,75 au lieu de 0,5 dans le cas précédent. Le rendement réel de tels cycles dépasse 0,5 (entre 0,5 et 0,55). Ces cycles combinés représentent la nouvelle génération de centrales électriques à haut rendement.

De tels cycles sont très bien adaptés pour les combustibles fossiles aussi bien que pour la biomasse (la température de flamme de la combustion est supérieure à $1\,200\text{ K}$) ou l'énergie solaire à très haute concentration (centrales à tours ou centrales à miroirs paraboliques de révolution). En revanche, ils ne sont pas adaptés aux centrales nucléaires car l'utilisation d'eau pressurisée ou de sel fondu ne permet pas d'atteindre des valeurs de $1\,200\text{ K}$ à la source chaude. L'utilisation de sodium fondu le permettrait (ce qui était le cas pour Super Phénix). Dans les projets de centrales nucléaires à sel fondu, la température de la source chaude serait d'environ 800 K ($527\text{ }^\circ\text{C}$) ce qui conduirait à un rendement de Carnot de 0,625 et pourrait conduire à un rendement de conversion électrique réel compris entre 0,4 et 0,44.

Pour les nouvelles centrales thermiques utilisant un cycle combiné, la réduction des émissions de CO_2 par rapport à une centrale conventionnelle est importante. C'est ainsi que d'ici 2030 on pourrait réduire la consommation d'énergie primaire de 34 % en utilisant uniquement des centrales à cycles combinés dont le rendement serait égal à 0,52 (tableau II.1).

TABLEAU II.1 INFLUENCE DU RENDEMENT SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE PRIMAIRE ET L'ÉNERGIE REJETÉE POUR PRODUIRE 2 235 MTEP D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE.

η	Énergie primaire (Mtep)	Économie d'énergie primaire (Mtep)	Énergie rejetée (Mtep)	Économie de rejet d'énergie (Mtep)
0,33	6772	0	4537	0
0,52	4300	2 472	2065	2 472

Un rendement plus élevé présente deux avantages : il permet une économie d'énergie primaire et permet également de réduire, d'autant, le rejet thermique.

Annexe III

La cogénération¹

L'activité humaine génère des besoins d'électricité, de chaleur ou encore de froid. En ce qui concerne les besoins d'électricité, dans l'annexe II, nous avons vu que les nouvelles générations de centrales thermiques utilisant des combustibles fossiles présentaient des rendements élevés, de l'ordre de 0,52, voire plus. Dans ce cas, la centrale rejette à l'environnement ambiant une quantité de chaleur (48 % de l'énergie primaire utilisée) proche de la quantité d'électricité produite. Pour l'instant, cette chaleur rejetée à basse température n'est pas valorisée. Il existe des cas où, d'un point de vue thermodynamique et/ou environnemental, il peut être plus judicieux de dégrader légèrement le rendement électrique et de valoriser simultanément la valeur rejetée : c'est le concept de la *cogénération*.

La cogénération produit de l'énergie motrice (convertie généralement en électricité) et de la chaleur. Cette chaleur peut elle-même être utilisée pour la production de froid en faisant appel à un système à sorption ; on parle alors de *trigénération* : production d'électricité, de chaleur et de froid.

D'un point de vue technique, les composants utilisés par une unité de cogénération sont soit des moteurs thermiques (typiquement des

1. Pour plus de détails, se reporter à [15], F. Meunier, *Thermodynamique de l'ingénieur*, 2004.

moteurs de camions), des turbines à vapeur ou des turbines à gaz. Le choix de la technologie dépend de la puissance visée et du niveau de température de la chaleur. Sans entrer dans les détails, disons que de très gros progrès ont été réalisés dans la récupération de chaleur (par exemple pour un moteur, on récupère la chaleur à la fois sur le liquide de refroidissement et sur les gaz d'échappement). De cette manière, il est possible d'avoir un rendement global supérieur à 0,85. Cependant, il ne faut pas se laisser abuser par des valeurs élevées de rendement global (η_g) qui représente la somme d'un rendement électrique (η_{el}) et d'un rendement thermique (η_{th}). En effet, on définit les rendements suivants :

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{el} = \frac{\text{énergie électrique}}{\text{énergie primaire}} = \frac{|W_{el}|}{Q_{sc}} \\ \eta_g = \frac{\text{énergie utile}}{\text{énergie primaire}} = \frac{|W_{el}| + |Q_{ut}|}{Q_{sc}} \\ \eta_{th} = \frac{\text{chaleur utile}}{\text{énergie primaire}} = \frac{|Q_{ut}|}{Q_{sc}} = \eta_g - \eta_{el} \end{array} \right. \quad (1)$$

où W_{el} , Q_{ut} et Q_{sc} sont l'énergie électrique produite, la chaleur utile produite, et la chaleur utilisée comme énergie primaire à la source chaude (que l'on peut éventuellement compter en Mtep).

On peut montrer [15] que la cogénération utilisant un combustible fossile n'est bénéfique pour l'environnement que si d'une part une grande fraction de la chaleur utilisable est effectivement utilisée, et d'autre part le rendement électrique est suffisamment élevé.

En effet, si on utilise un combustible fossile qui émet A kg de CO_2 par kWh, et si on considère une unité de cogénération qui produit une quantité d'électricité égale à W_{el} et une quantité de chaleur utile Q_{ut} , à partir d'une source chaude qui absorbe une quantité d'énergie primaire égale à Q_{sc} , elle va émettre une quantité de CO_2 égale à E_m^{cog} .

La solution conventionnelle prélevant la quantité d'électricité W_{el} sur le réseau électrique et produisant la quantité de chaleur Q_{ut} à partir de combustion de gaz naturel va émettre une quantité de CO_2 égale à E_m^{conv} .

Ces émissions sont respectivement égales à :

$$\left\{ \begin{array}{l} E_m^{cog} = Q_{sc} \times A_{GN} \\ E_m^{conv} = W \times A_{el} + Q_{ut} \times A_{GN} \end{array} \right. \quad (2)$$

où A_{el} et A_{GN} sont respectivement les quantités de CO_2 émises pour produire 1 kWh d'électricité ou de chaleur à partir de combustion de gaz naturel.

Tous calculs effectués, on trouve que la condition pour la cogénération d'être bénéfique pour l'environnement est :

$$\eta_{el} > \frac{1 - \eta_g}{\frac{A_{el}}{A_{GN}} - 1} \quad (3)$$

Avec les technologies actuelles, le rendement électrique des unités de cogénération est compris entre 0,15 et un peu plus de 0,4, et le rendement global est le plus souvent supérieur à 0,8. Le rendement électrique croît avec la puissance des unités de cogénération.

En appliquant la relation (3) au cas de la moyenne mondiale, avec $A_{el} \approx 0,6$ et $A_{GN} \approx 0,2$, on trouve qu'il faut $\eta_{el} > 0,1$ pour obtenir $\eta_g = 0,8$, ce qui est une condition très facile à réaliser. En revanche, dans le cas de la France, où l'électricité est très majoritairement nucléaire et hydraulique, le coefficient $A_{el} \approx 0,1$, si bien que la cogénération n'est pas une bonne solution en substitution à l'électricité nucléaire. Ce n'est une bonne solution en France qu'en hiver, en substitution à l'électricité produite par des centrales d'appoint qui présentent un faible rendement et émettent beaucoup de CO_2 par kWh_{el}.

La gestion du parc d'unités de cogénération exige de la rigueur pour s'assurer que c'est une bonne solution pour l'environnement. Notamment, les unités de cogénération doivent impérativement être dimensionnées pour assurer les besoins en chaleur et non pas en électricité. En France, les unités de cogénération sont utilisées quasi exclusivement pendant les mois d'hiver et représentent alors une bonne solution pour l'environnement car elles permettent de valoriser la chaleur et de réduire le recours aux centrales électriques d'appoint. Par ailleurs les unités de cogénération se trouvant à proximité de l'utilisation, elles permettent de réduire les pertes en ligne dues au transport d'électricité (rappelons que ces pertes en ligne atteignent 15 %).

Si un biocombustible est utilisé en lieu et place d'un combustible fossile, A_{bio} est proche de zéro et la situation est radicalement modifiée. C'est ainsi que si, pour simplifier, on prend $A_{bio} = 0$, la contribution à l'effet de serre de la cogénération serait nulle et la cogénération au biocombustible serait toujours favorable à l'environnement, même en France. De plus, si le biocombustible est du biogaz qui a permis d'éviter des émissions de méthane, la cogénération devient un puits de CO_2 .

Annexe IV

La combustion¹

La combustion est une réaction chimique au cours de laquelle un combustible réagit avec un oxydant (l'oxygène de l'air) pour donner naissance à de l'eau et, le plus souvent sauf dans le cas de l'hydrogène, du dioxyde de carbone [15]. Cette réaction est irréversible et exothermique (elle dégage de la chaleur). On appelle PCI (pouvoir calorifique inférieur) la quantité de chaleur dégagée au cours d'une combustion idéalisée dans laquelle les produits de combustion sortent à l'état gazeux et à température ambiante. Parmi les gaz de combustion, le dioxyde de carbone va retenir toute notre attention. Pour les applications énergétiques qui nous intéressent dans cet ouvrage, il est possible de comparer les combustibles au niveau du dioxyde de carbone émis par unité de chaleur produite (tableau IV.1).

L'émission de dioxyde de carbone d'une tep est égale à 3,2 tCO₂/tep si on prend comme référence le pétrole mais elle est égale à 2,9 tCO₂/tep environ si on prend comme référence l'octane.

1. Pour plus de détails, se reporter à [15], F. Meunier, *Thermodynamique de l'ingénieur*, 2004.

TABEAU IV.1 QUANTITÉS DE CHALEUR ET DE DIOXYDE DE CARBONE ÉMIS RÉSULTANT DE LA COMBUSTION DE QUELQUES COMBUSTIBLES USUELS.

Combustible	Formule chimique	PCI (kJ/kg)	Dioxyde de carbone émis (kgCO ₂ /kWh)
Hydrogène	H ₂	120 500	0
Carbone	C	32 750	0,403
Méthane	CH ₄	50 000	0,198
Octane	C ₈ H ₁₈	46 600	0,248
Méthanol	CH ₃ OH	19 920	0,248
Éthanol	C ₂ H ₅ OH	26 820	0,256
Bois		≈ 31 000	≈ 0,409
Charbon		de 30 000 à 35 000	≈ 0,330
Gaz naturel		≈ 40 190	≈ 0,190
Pétrole		≈ 39 775	≈ 0,275

Annexe V

Les pompes à chaleur¹

Une pompe à chaleur (PAC) est un système thermodynamique identique à un groupe frigorifique. La seule différence provient de l'utilisation de la chaleur au sein du système. Dans le groupe frigorifique, c'est le froid produit à la source froide à basse température qui est utilisé, alors que dans le cas de la pompe à chaleur, c'est la chaleur rejetée à l'environnement et dont la température est supérieure à la température ambiante. Dans la suite, on distinguera les pompes à chaleur électriques et les pompes à chaleur thermiques, bien que seules les pompes à chaleur électriques soient largement commercialisées.

V.1 POMPES À CHALEUR ÉLECTRIQUES

Dans une pompe à chaleur électrique, les composants principaux sont les mêmes que pour un groupe frigorifique : un évaporateur, un compresseur électrique, un condenseur et un organe de détente. En appelant Q_{sf} la chaleur prélevée à basse température à la source froide, Q_{sc} la chaleur rejetée au niveau du condenseur (cette chaleur est comptée négativement car rejetée), et W le travail, ou l'énergie électrique,

1. Pour plus de détails, se reporter à [15], F. Meunier, *Thermodynamique de l'ingénieur*, 2004.

utilisé(e) pour le compresseur, le bilan, en régime permanent et en négligeant les pertes, s'écrit simplement :

$$Q_{sc} = Q_{sf} + W \quad (1)$$

On définit les efficacités du groupe frigorifique et de la pompe à chaleur à l'aide de deux coefficients, respectivement COP et COA, tels que :

$$\text{COP} = \frac{Q_{sf}}{W} \quad \text{et} \quad \text{COA} = \frac{Q_{sc}}{W} \quad (2)$$

Ces deux coefficients dépendent des températures de fonctionnement. Tenant compte de l'énergie électrique dépensée par tous les auxiliaires (pompes et ventilateurs), les valeurs des efficacités pour la climatisation et les PAC destinées à l'habitat sont typiquement :

- COP = 2,2 (mode froid) ;
- COA = 3 (mode chauffage).

S'agissant de la fonction de climatisation, nous avons déjà mentionné que le froid Q_{sf} produit pour climatiser les locaux entraîne une dissipation de chaleur Q_{sc} qui, généralement, est évacuée dans l'air ambiant (au travers notamment de tours de refroidissement ou d'aéro-réfrigérants). Or cette quantité de chaleur Q_{sc} est supérieure au froid produit, Q_{sf} , si bien que le bilan global de la climatisation est un apport de chaleur. Typiquement pour 1 MWh de froid produit par une climatisation, on rejette une quantité de chaleur de l'ordre de 1,33 MWh dans l'environnement. Dans ce cas, la chaleur dissipée contribue à augmenter la température ambiante, ce qui s'avère particulièrement pervers en cas de canicule (voir annexe VI). En fait, la solution est d'évacuer la chaleur du condenseur dans le sous-sol ou dans un cours d'eau afin d'éviter l'élévation de température du milieu ambiant. Si on produit 1 MWh de climatisation, on évacue 1,33 MWh dans le sous-sol : dans ce cas le bilan est un abaissement de la température de l'environnement.

Dans le cas de la pompe à chaleur, en revanche, la situation est très différente : la quantité de chaleur utile est supérieure à l'énergie électrique utilisée et à la chaleur « gratuite » prélevée à l'environnement. En effet, il existe un effet d'amplification. Si l'on compare l'énergie consommée par un radiateur électrique et par une pompe à chaleur électrique, on constate ainsi qu'elle est réduite d'un facteur égal au COA de la PAC, soit de l'ordre de 2 à 3. L'utilisation d'une PAC plutôt que de radiateurs électriques pour le chauffage de locaux se traduit donc par une réduction importante de la facture d'électricité. Le chauffage

par radiateurs électriques est une aberration aussi bien thermodynamique qu'économique pour l'utilisateur et le remplacement des radiateurs électriques par des pompes à chaleur représente une possibilité de réduction importante de la consommation d'énergie dans tous les pays (dont la France) où cette pratique est courante.

Le problème dans le cas de la pompe à chaleur est qu'il faut prélever de la chaleur à basse température dans l'environnement. Plusieurs possibilités existent : l'air extérieur, l'air extrait dans le cas d'une centrale de traitement d'air, une rivière ou un bassin, etc. Une des meilleures solutions consiste à prélever la chaleur dans le sous-sol : on parle alors de pompe à chaleur géothermale. Cette technologie se développe assez rapidement. Les échangeurs qui prélèvent la chaleur dans le sous-sol sont généralement placés à quelques dizaines de centimètres sous le niveau du sol. Cette technologie est particulièrement adaptée pour les pompes à chaleur dites « réversibles ». Nous avons mentionné plus haut qu'une pompe à chaleur et un groupe frigorifique fonctionnaient suivant le même principe ; il existe des installations, appelées pompes à chaleur réversibles, qui sont dotées d'une vanne quatre voies, de telle sorte qu'elles permettent de chauffer des locaux en hiver et de les rafraîchir en été. S'agissant de pompes à chaleur réversibles géothermales, elles évacuent, en été, la chaleur dans le sous-sol, et en hiver, elles y prélèvent la chaleur gratuite : le bilan annuel pour le sous-sol est quasi équilibré car les quantités de chaleur échangées au cours des deux saisons sont proches. Ces PAC réversibles géothermales constituent d'excellentes solutions pour l'environnement : elles permettent d'avoir une consommation énergétique raisonnable pour le chauffage et pour la climatisation, et elles ne contribuent pas à l'aggravation de la canicule.

Le problème environnemental avec ces composants (pompes à chaleur ou groupes frigorifiques) est le fluide frigorigène utilisé. En effet, il s'agit le plus souvent d'un HFC possédant un fort coefficient d'échauffement global (GWP). Néanmoins, le dioxyde de carbone, dont le GWP est très faible puisqu'il est égal à 1 (à comparer à 1 300 pour le R134a), est un fluide frigorigène qui présente d'excellentes performances pour les PAC et qui devrait s'imposer rapidement dans les PAC géothermales réversibles, ce qui résoudrait le problème du GWP du fluide.

Une des applications des pompes à chaleur est le chauffe-eau pompe à chaleur en substitution au chauffe-eau électrique. Dans ce cas, la consommation électrique est réduite d'un facteur 3 et le fluide frigorigène peut être le dioxyde de carbone.

V.2 SYSTÈMES À ÉNERGIE TOTALE (THERMO-FRIGOPOMPES)

Nous venons de voir que dans une pompe à chaleur ou un groupe frigorifique on pouvait valoriser le froid produit aussi bien que la chaleur rejetée. L'idéal serait d'utiliser les deux. Ceci n'est possible que s'il existe des besoins simultanés de chaleur et de froid. Il y a de nombreux cas : lorsqu'il y a des besoins de climatisation, il y a généralement des besoins d'eau chaude sanitaire ; même en hiver, dans les immeubles de bureaux, des salles ont besoin d'être climatisées (informatiques par exemple) alors que d'autres ont besoin d'être chauffées ; dans les centres sportifs équipés de patinoires, il est possible d'utiliser la chaleur rejetée pour la climatisation, etc. Ce sont les bureaux d'études thermiques qui doivent être vigilants pour détecter toutes les possibilités de telles applications qui peuvent se traduire par des économies importantes d'énergie.

V.3 POMPES À CHALEUR THERMIQUES À SORPTION¹

La PAC à sorption est un système à compression thermique de vapeur qui utilise la chaleur comme énergie primaire en lieu et place de l'électricité utilisée pour les PAC que nous venons d'évoquer. À nouveau, la PAC produit du froid, Q_{sf} , à basse température et rejette de la chaleur, Q_{sc} , à la source à température intermédiaire. Mais, maintenant, l'énergie motrice n'est plus l'électricité mais de la chaleur haute température (entre 100 °C et 200 °C, voire plus, suivant les systèmes) utilisée pour la régénération, Q_{reg} . Le bilan thermique, en régime permanent et en négligeant les pertes, s'écrit maintenant :

$$Q_{sc} = Q_{sf} + Q_{reg} \quad (3)$$

On récupère à la température intermédiaire l'équivalent de la somme de la chaleur prélevée à basse température et de la chaleur prélevée à haute température pour la régénération.

Pour l'instant, des groupes refroidisseurs de liquide sont commercialisés et utilisés pour la climatisation. Ils peuvent être utilisés pour le chauffage en hiver mais, malheureusement, dans ce mode de

1. Pour plus de détails, se reporter à [13], F. Meunier, P. Rivet, M.F. Terrier, *Le froid industriel*, 2005.

fonctionnement, seule la chaudière est utilisée et on ne tire pas partie de l'effet d'amplification de la PAC. Typiquement, les valeurs des efficacités des PAC LiBr-eau actuellement commercialisées sont :

- COP = 1 (mode froid) ;
- COA = 0,9 (mode chauffage).

Le COA est en fait un rendement de chaudière. En laboratoire, on sait faire mieux et l'objectif devrait être :

- COP = 1 (mode froid) ;
- COA = 1,5 à 1,7 (mode chauffage).

Si de tels composants existaient, ils pourraient être utilisés pour valoriser les rejets thermiques d'unités de cogénération. En été, ils permettraient de valoriser la chaleur pour produire du froid, et en hiver, ils permettraient d'amplifier la chaleur rejetée par la cogénération.

Il faut être très vigilant et analyser soigneusement l'impact environnemental de tels composants. En effet, ils sont toujours très bénéfiques pour l'environnement s'ils utilisent pour la régénération de la chaleur perdue. En revanche, lorsqu'ils utilisent de la chaleur provenant de la combustion du gaz naturel, le bilan environnemental peut être mauvais. La situation redevient favorable pour l'environnement si du biogaz est utilisé [10].

De tels composants ont peu de chances de se développer à court terme sans une forte pression de la contrainte environnementale, auquel cas leur émergence pourrait alors être rapide.

Annexe VI

Canicule et réchauffement planétaire

L'effet canicule observé durant l'été 2003 en Europe, avec ses conséquences dévastatrices en France, est un phénomène séculaire qui n'est pas uniquement lié au réchauffement planétaire. Néanmoins, suite au réchauffement planétaire, ce type de situations risque d'être plus fréquent qu'il n'était habituellement. Dans leur ouvrage *Le climat : jeu dangereux* [20], Jouzel et Debroise estiment que « dans la seconde moitié du XXI^e siècle, la chaleur de l'été 2003 pourrait être dépassée plus d'une vingtaine de fois. Autant dire que la canicule 2003 sera la norme dans cinquante ans ». La figure VI.1 donnant l'évolution prédite de la température moyenne en été en France de 1860 à 2100 se passe en effet de commentaires.

Il est donc important d'étudier les réponses à apporter à de telles canicules ainsi susceptibles de se multiplier. D'abord, une première leçon à tirer de la façon dont les pics de chaleur sont gérés (en France notamment) est d'admettre, enfin, que la climatisation n'est pas toujours un luxe mais peut représenter un élément de survie, dans le cas de températures extrêmes, pour certaines populations à risques. Les deux problèmes avec la climatisation sont d'une part qu'elle consomme beaucoup d'énergie et d'autre part que la climatisation appelle la climatisation. Ce dernier point est essentiel, il a déjà été observé aux

États-Unis et il arrive en Europe : la climatisation des grands magasins, puis maintenant des voitures appelle la climatisation des lieux de travail et enfin des lieux d'habitation. Enfin, comme nous l'expliquerons plus loin, la climatisation d'un local entraîne l'échauffement de l'environnement si bien qu'au fur et à mesure que la climatisation s'installe dans une ville, la température moyenne augmente, d'où un besoin de l'extension de la climatisation, bref c'est un cercle vicieux. C'est la raison pour laquelle il faut prévoir une gestion correcte de la climatisation et des sources d'énergie qui lui sont attachées (la source d'énergie et le rejet thermique de la climatisation).

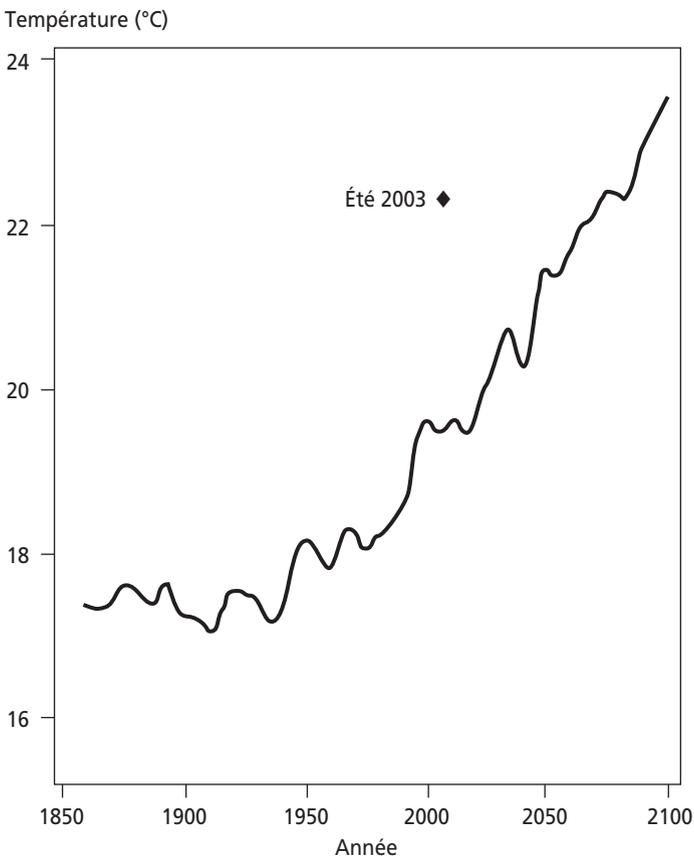


Figure VI.1 Évolution de la température moyenne en été (juin, juillet, août), en France, de 1860 à 2100.

Calculée par Dufresne ; source : [20].

VI.1 CLIMATISATION ET CANICULE

Lorsqu'on climatise un local, on produit du froid dans ce local mais, obligatoirement, on rejette une quantité de chaleur supérieure dans un autre endroit (annexe V, [13], [15]). Par exemple, un climatiseur qui fournit 10 kW de rafraîchissement utilise typiquement 2,5 kW d'énergie électrique et rejette 12,5 kW de chaleur à l'environnement, généralement sous forme d'air chaud (le condenseur du climatiseur est refroidi par l'air soufflé par un ventilateur). En ville, ce rejet de chaleur est généralement effectué au travers de tours de refroidissement ou d'aéro-réfrigérants [13]. Le bilan net est donc que pour une production de froid de 10 kW, l'apport de chaleur dans l'environnement est de 2,5kW : 12,5 kW d'air chaud compensés partiellement par les 10 kW d'air frais produits. En refroidissant l'intérieur d'un local, on réchauffe donc l'air ambiant de la ville (ceci est également vrai pour la climatisation de l'habitable d'une voiture). Dans une mégapole, ce sont des centaines de MW de rafraîchissement qui sont fournis pour la climatisation, et donc des dizaines de MW qui contribuent à l'échauffement de la cité. Conclusion, plus on climatise de locaux, plus on crée le besoin de climatisation dans les locaux voisins car la température devient de plus en plus insupportable. C'est ce qui se produit actuellement dans les grandes villes durant les pics de chaleur.

Ce processus n'est pourtant pas inéluctable : la solution est de ne pas rejeter la chaleur dans l'atmosphère, mais dans le sous-sol ou les rivières (ou lacs, ou bassins). La technique d'utilisation du sous-sol comme source de chaleur est couramment utilisée pour les pompes à chaleur géothermales. Une pompe à chaleur fonctionne comme un réfrigérateur, la seule différence étant que dans la pompe à chaleur c'est la chaleur qui est utilisée et non le froid ; il s'agirait tout simplement de transposer cette technique aux climatiseurs. Les apports extérieurs de chaleur dans le local climatisé étant ainsi évacués, la climatisation dans un local se traduit par un léger rafraîchissement de l'air ambiant. En reprenant notre exemple précédent, un climatiseur produisant 10 kW de rafraîchissement et éliminant les 12,5 kW de rejet thermique dans le sous-sol contribue à rafraîchir l'environnement à hauteur de 12,5 kW. À l'échelle d'une mégapole, les centaines de MW de rafraîchissement fournis pour la climatisation contribueraient à abaisser la température de la cité. La première mesure à prendre est donc bien d'évacuer la chaleur issue de la climatisation. Notons qu'il est possible de valoriser cette chaleur rejetée, par exemple pour chauffer une piscine ou pour préchauffer l'eau chaude sanitaire. Grâce à une

telle gestion de la climatisation, les locaux climatisés seront plus frais que l'air extérieur qui sera lui-même légèrement plus frais qu'en l'absence de climatisation. La spirale de la de climatisation qui incite toujours à plus de climatisation est donc brisée, ce qui est essentiel.

Mais la climatisation a besoin d'énergie : quelle source utiliser ?

VI.2 UTILISATION INTENSIVE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE INTÉGRÉE À L'HABITAT

L'idéal est l'utilisation de l'énergie solaire. En effet dans les villes où des températures extrêmes sont observées, le problème est d'éliminer le maximum d'énergie solaire incidente. L'utilisation intensive de surfaces pour capter l'énergie solaire permet d'éviter les montées excessives de température. Deux filières existent pour la climatisation solaire : la première utilise des cellules photovoltaïques et des systèmes à compression mécanique de vapeur, la seconde des systèmes à sorption avec compression thermique de vapeurs [13]. Nous ne rentrerons pas ici dans les détails mais, dans les deux filières, une partie de l'énergie solaire est captée pour produire du froid et de la chaleur est rejetée à l'environnement. Comme nous venons de le voir, cette chaleur doit impérativement être évacuée dans l'eau ou le sous-sol et non rejetée dans l'air.

Avec un panneau photovoltaïque, c'est environ 15 à 20 % de l'énergie solaire qui est captée, avec un capteur solaire thermique, environ 50 %. Considérons un panneau solaire photovoltaïque de 50 m² qui fournit une puissance électrique d'environ 6 kW_{el} sous un ensoleillement de 800 W/m². À l'aide de ces 6 kW_{el}, un climatiseur fournira de l'ordre de 24 kW de rafraîchissement. La chaleur rejetée sera donc de 30 kW, et si elle l'est dans le sous-sol, cela correspondra à un gain pour l'environnement (les 6 kW d'énergie solaire évitée et les 24 kW de rafraîchissement produit, soit 600 W/m²).

Si le froid est produit par un système à sorption, considérons à nouveau un panneau de 50 m² de capteurs solaires thermiques fournissant 24 kW de chaleur. Le climatiseur produira alors environ 20 kW de rafraîchissement. Si, à nouveau, la chaleur rejetée dans l'environnement l'est dans le sous-sol, le gain pour l'environnement est maintenant de 44 kW (24 kW d'énergie solaire évitée et 20 kW de rafraîchissement produit), soit 880 W/m².

Dans les deux cas, le rafraîchissement est conséquent puisqu'il est du même ordre de grandeur que l'énergie solaire incidente. Un équipement

intensif de surfaces solaires (thermiques et photovoltaïques) permettrait ainsi de réduire l'apport d'énergie solaire dans une ville et, conjugué à de la climatisation bien conçue, d'y créer un microclimat plus frais que l'environnement. En combinant l'utilisation intensive de panneaux solaires et de la climatisation (avec rejet dans le sous-sol ou dans l'eau de la chaleur), il serait donc possible de faire de nos cités non pas des fournaises mais au contraire de véritables oasis de fraîcheur.

Toutefois, l'utilisation intensive de l'énergie solaire peut satisfaire les besoins en énergie de la climatisation pour un habitat pavillonnaire, mais pas pour des immeubles de grande taille. Typiquement un pavillon qui nécessite 20 kW de climatisation aura besoin d'environ 50 m² de capteurs solaires (soit de capteurs photovoltaïques d'une puissance électrique d'environ 4 kW_{el} pour alimenter un climatiseur à compression mécanique de vapeur, soit de capteurs thermiques pour alimenter un système de climatisation à sorption). En revanche, pour un immeuble, la surface de captation solaire peut devenir rédhibitoire, notamment si les besoins de climatisation sont élevés (cas des locaux commerciaux). Dans ce cas, il faut avoir recours à une source plus concentrée d'énergie. Bien entendu, il est possible d'utiliser l'électricité du réseau pour faire fonctionner un climatiseur à compression mécanique de vapeurs, mais il est également possible d'utiliser la trigénération pour valoriser le traitement des déchets.

VI.3 UTILISATION DE LA COGÉNÉRATION POUR LA CLIMATISATION

La valorisation, par la trigénération, du traitement des déchets urbains pour produire de l'électricité, de la chaleur et du froid est en effet une application idéale dans ce cas. D'une part, le traitement des déchets permet de réduire les émissions de méthane, d'autre part la cogénération produit, à partir du biogaz, de l'électricité et de la chaleur : on crée donc un puits de gaz à effet de serre (5.1.1). Enfin la chaleur produite peut être convertie, en partie ou en totalité selon les besoins, en froid en utilisant une machine à sorption [13]. Pour une ville, l'unité de cogénération correspondrait à une puissance importante (quelques centaines de kW suivant la taille de la ville), si bien qu'un réseau urbain de climatisation serait vraisemblablement utilisé. Mais des unités de cogénération de plus petite taille sont envisageables pour des bâtiments autonomes, tels qu'un centre commercial ou un hôpital.

Pour la climatisation de tels édifices, une unité de trigénération est idéale puisqu'on peut utiliser l'électricité pour faire fonctionner des climatiseurs électriques et la chaleur pour faire fonctionner des climatiseurs thermiques sachant, qu'en prime, on crée un puits de GES, ce qui est exceptionnel pour la climatisation. Enfin, la chaleur basse température rejetée par l'unité de cogénération et par les climatiseurs doit, à nouveau, être dissipée dans des bassins ou rivières ou dans le sous-sol.

Enfin, si la climatisation solaire et la trigénération à partir des déchets ne suffisent pas, le complément sera assuré à partir d'énergie électrique provenant du réseau.

La conclusion d'une telle gestion de la climatisation avec l'énergie solaire et avec la trigénération résultant du traitement des déchets est double :

- la température en ville sera inférieure à celle de l'environnement et la cité sera une oasis de fraîcheur si bien que la climatisation de sites prioritaires ne générera pas de besoins de climatisation d'autres sites
- la valorisation des déchets permet que la climatisation contribue à créer un puits de GES.

Ce type de gestion est donc adapté pour répondre aux besoins qui vont aller en croissant de climatisation pour résister aux canicules qui risquent de devenir plus fréquentes suite au réchauffement planétaire.

Annexe VII

Unités et notations utilisées

VII.1 UNITÉS

VII.1.1 L'énergie

L'unité pour l'énergie dans le système international est le joule (J) alors que le watt (W) est l'unité de la puissance, c'est-à-dire de l'énergie par unité de temps. D'autres unités sont toutefois plus couramment utilisées dans le secteur de l'énergie : le kWh (kilowattheure, qui représente le travail exécuté pendant une heure par une machine d'une puissance de 1 kilowatt ; $1 \text{ kWh} = 3\,600 \text{ J}$) et la tep (tonne équivalent pétrole, qui permet de comparer le potentiel d'une source d'énergie à celui d'une tonne de pétrole ; $1 \text{ tep} = 11,62 \text{ MWh}$).

Par ailleurs, on considère souvent de grandes quantités d'énergie et on utilise les notations :

- k pour kilo, $1 \text{ k} = 10^3$;
- M pour méga, $1 \text{ M} = 10^6$;
- G pour giga, $1 \text{ G} = 10^9$;
- T pour téra, $1 \text{ T} = 10^{12}$.

Ainsi, un milliard de joules s'écrit $1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J} = 10^6 \text{ kJ} = 10^3 \text{ MJ}$; un milliard de kWh s'écrit $1 \text{ TWh} = 10^9 \text{ kWh}$.

On utilise également des unités et des notations plus spécifiquement adaptées aux différents types d'énergies et de sources d'énergie :

- W_c : Watt-crête, c'est l'unité de puissance d'un capteur photovoltaïque, qui correspond à une puissance électrique de 1 Watt dans de bonnes conditions d'ensoleillement et d'orientation ;
- W_{el} : « Watt électrique », indique que la puissance disponible l'est sous forme d'électricité. De même, on note Wh_{el} (« wattheure électrique ») lorsqu'une confusion sur le type d'énergie est possible.

VII.1.2 Autres unités

D'autres unités sont utilisées dans cet ouvrage. En voici la liste :

- K : le kelvin, unité de température du système international, telle que $t = T - 273,15$, avec t en °C et T en K ;
- ppm : partie par million, donne la proportion d'un corps dans un mélange (ppmv, partie par million en volume ; ppb, partie par milliard (*billion*)) ;
- tC-eq : tonne équivalent carbone, sert à mesurer une quantité de carbone indépendamment du composé chimique dans lequel il peut se trouver ;
- baril : 159 litres, soit environ 0,136 tonne, de pétrole.

VII.2 SIGLES ET ABRÉVIATIONS

- AIE : Agence internationale de l'énergie (en anglais, IEA, pour International energy agency), créée en 1974 comme un organe autonome de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économique) ;
- CFC : chlorofluorocarbures, obtenus par substitution d'un ou plusieurs atomes d'hydrogène d'un carbure saturé par des atomes de chlore et de fluor, à la fois gaz à effet de serre et responsables de la destruction de la couche d'ozone ;
- ENR : énergies renouvelables, c'est-à-dire dont les sources ne sont pas susceptibles d'épuisement (solaire, éolien, hydraulique, mais aussi piles à hydrogène) ;
- GES : gaz à effet de serre. Ayant la capacité d'absorber le rayonnement infrarouge émis par la terre, ces gaz augmentent la capacité de l'atmosphère à retenir la chaleur, ce qui revient à dire qu'ils contribuent à faire diminuer ε , le coefficient d'émissivité de la terre (voir annexe I). Ce sont principalement la vapeur d'eau, le dioxyde de

- carbone (CO_2), le méthane (CH_4) et les autres hydrocarbures, les oxydes d'azote (NO_x), les composés halogénés (CFC, HCFC, HFC...), etc.
- GIEC : Groupe international d'experts sur le climat (en anglais, IPCC, pour International panel on climate change), créé en 1988 sous l'égide des Nations unies et de l'Organisation météorologique mondiale ;
 - HC/HP : heures creuses/heures pleines, s'agissant de production d'électricité ;
 - HQE : haute qualité environnementale. L'association HQE a été créée en 1997 conjointement par le ministère de l'équipement et l'ADEME (Agence de l'environnement et de maîtrise de l'énergie). Elle regroupe des organismes professionnels du bâtiment et définit une démarche qualité qui doit permettre aux constructions de respecter les principes du développement durable ;
 - PAC : suivant le contexte, politique agricole commune ; pompes à chaleur (voir annexe V) ; pile à combustible (voir 4.2, Les transports) ;
 - PED : pays en développement. Il n'existe pas de définition objective qu'aurait établie une organisation internationale ; on regroupe en général sous ce terme les pays émergents, dont le PIB par habitant est encore éloigné des pays les plus riches mais à la croissance économique fermement établie, et les pays en transition, qui sont engagés dans le passage d'une économie étatisée à une économie de marché.

Bibliographie

- [1] GIEC, *Third assessment report*, Cambridge University Press, 2001.
- [2] SAUGIER B., *Végétation et atmosphère*, Dominos, Flammarion, 1996
- [3] AIE, rapport AIE/SLT, 2002.
- [4] CEA, *Informations sur l'énergie*, CEA éditeur, 2003.
- [5] AIE, *World energy outlook 2002*, OCDE/AIE éditeurs, 2002 (www.ieagreen.or.uk).
- [6] Cdiac, *Trends online*, 2003 (cdiac.esd.ornl.gov/trends/trends.htm).
- [7] AIE, *Biofuels for transport*, AIE éditeur, 2004 (www.iea.org/books).
- [8] GUESNERIE R., *Combattre l'effet de serre nous mettra-t-il sur la paille ?*, Le Pommier, 2003.
- [9] GUESNERIE R., *Kyoto et l'économie de l'effet de serre*, CAE/La Documentation Française, 2003.
- [10] CHEVALIER C., MEUNIER F., Environmental assessment of biogas co- or tri-generation units by life cycle analysis methodology, *Applied thermal energy*, à paraître.
- [11] *Systèmes solaires*, L'Observateur des Énergies Renouvelables éditeur (www.energies-renouvelables.org).
- [12] NGÔ C., *L'Énergie*, UniverSciences, Dunod, 2002.
- [13] MEUNIER F., RIVET P., TERRIER M.-F., *Le froid industriel*, Dunod, 2005.
- [14] OPECST, BIRRAUX C., LE DÉAUT J.-Y., *L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables*, Sénat éditeur, 2002.

-
- [15] MEUNIER F., *Thermodynamique de l'ingénieur*, Aide-mémoire, Dunod, 2004.
- [16] CEA, *Elecnuc*, CEA éditeur, 2003.
- [17] Commissariat général du Plan, Énergie 2010-2020, *La Documentation Française*, 1998.
- [18] GIEC, *IPCC workshop on carbon dioxide capture and storage*, Regina, Canada, 2002, ECN, 2002 (www.climatepolicy.info/ipcc/ipcc-ccs-2002).
- [19] *Livre vert. Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique*, rapport à la Commission européenne, COM 769, 2000 (europa.eu.int/comm/energy_transport/fr/lpi_lv_fr1.html).
- [20] JOUZEL J., DEBROISE A., *Le climat : jeu dangereux*, Quai des sciences, Dunod, 2004.
- [21] HOUGHTON R.A., Magnitude, distribution and causes for terrestrial carbon sinks and some implications for policy, *Climate policy*, 2, pp. 71-88, 2002.

Index

A

albedo 132

B

baril 21

biocarburants 25, 50, 61

biodiesels 64

biogaz 58, 59

biomasse 57

bois 60

bonus/malus 119

C

canicule 81, 157

capteurs solaires thermiques 73

capture de CO₂ 99, 104

cellules photovoltaïques 78

centrales

à cycles IGCC 105

électriques 41

électronucléaires 41

changement climatique 31

chauffe-eau solaire 72

climatisation 81, 159

solaire 160

cogénération 24, 42, 145, 161

combustibles fossiles 5

combustion 149

consommations d'énergie 21

cultures énergétiques 58, 100

cycle

combiné 24, 41, 49, 142

du carbone 7

thermodynamique 74, 141

D

déchets

agricoles 59

nucléaires 93

urbains 59

développement durable 30, 123

E

économies d'énergie 24

écotaxe 118

émissionsde CO₂ 21

de méthane 59

émissivité 132**énergie**

cinétique 134

éolienne 25, 57, 68

hydraulique 57

nucléaire 91

primaire 17

renouvelable 2, 13, 24, 57

solaire 25, 54, 81

photovoltaïque 54, 57, 78

thermique 54, 57, 71

ENR 57

essences sans plomb 63

éthanol 61

F

fermes éoliennes offshore 70

fission 91

flux

infrarouge 132

solaire 132

forçage radiatif 5, 59

négatif 2, 137

positif 2, 135

fusion 91

G

gaz à effet de serre 1, 5

gazoduc 107

géothermie 57, 82

Hhaute qualité environnementale 24,
53**heures**

creuses 94

pleines 94

hydraulique 24, 85

Iinjection de CO₂ 106**M**

moteur hybride 49

MTBE 63

N**nappes**

aquifères salines 107

phréatiques 84

P

photosynthèse 7

piles à combustible 24, 50

PNB 18

pompes à chaleur 53, 151

électriques 151

géothermales 53, 82, 84

thermiques 154

principe de Carnot 141

procédés propres 13

production d'électricité 39, 141

Protocole de Kyoto 21, 34

puits

de carbone 99

de GES 36

R

réaction nucléaire 92

reboisement 100

récupération assistée du pétrole 107

rente énergétique 118

réseaux de chaleur 84

réservoirs géologiques 108

réutilisation du CO₂ 110**S**

séquestration 99

du CO₂ 106

silicium cristallin 79

solaire thermique haute température

à miroir

cylindro-parabolique 75

parabolique de révolution 74

à tour solaire 75

stockage 99
substitution de combustible 45
sûreté 93

T

thermo-frigopompes 154
traitement des déchets 102

transports 48
trigénération 145
turbines à vapeur 41

U

utilisation rationnelle de l'énergie
37, 55

Francis Meunier

DOMESTIQUER L'EFFET DE SERRE

Énergies et développement durable

L'utilisation intensive des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) depuis 150 ans place aujourd'hui l'homme devant un double défi : l'augmentation de l'effet de serre aux conséquences climatiques catastrophiques, et l'épuisement prévisible de ces sources d'énergie du sous-sol.

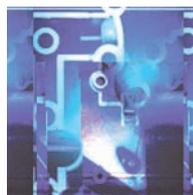
Destiné à un large public, cet ouvrage invite à envisager les questions de l'énergie et de l'effet de serre de façon globale et sans esprit partisan. Il expose les différentes méthodes de lutte contre l'augmentation de l'effet de serre (économies d'énergie, puits de carbone, cogénération...), décrit les principales sources d'énergie alternatives aux énergies fossiles (biomasse, éolien, solaire, nucléaire...), et montre que, pour préoccupant qu'il soit, l'avenir n'est pas aussi sombre qu'il y paraît : des solutions techniques existent en effet, qui permettront à la fois de répondre aux besoins énergétiques croissants de l'humanité et d'enrayer la dérive climatique.



ISBN 2 10 048754 X

Cnam
CONSERVATOIRE NATIONAL
DES ARTS ET METIERS

www.dunod.com



FRANCIS MEUNIER

est responsable du pôle « Sciences et techniques industrielles » du Cnam, où il occupe la chaire de Physique du froid. Il est également directeur de l'Institut français du froid industriel (IFFI) et a participé aux travaux du GIEC (Groupe international d'experts sur le climat).

MATHÉMATIQUES

PHYSIQUE

CHIMIE

SCIENCES DE L'INGÉNIEUR

INFORMATIQUE

SCIENCES DE LA VIE

SCIENCES DE LA TERRE

