

COMMUNICATION À
l'Académie des technologies

PROSPECTIVE SUR
L'ÉNERGIE AU XXI^e SIÈCLE

Commission « Energie et changement climatique »

Octobre 2008

Les publications de l'Académie des technologies

L'Académie des technologies publie quatre collections :

- une collection sous **couverture bleue**, reproduisant les avis et rapports de l'Académie, approuvés par l'Assemblée ;
- une collection sous **couverture rouge**, reproduisant des **communications à l'Académie**, rédigées par des académiciens, non soumises au vote de l'Assemblée et publiées sur décision du Conseil académique ;
- une collection sous **couverture verte**, avec des textes courts rédigés par un ou plusieurs académiciens et consacrés à **dix questions** d'actualité sur un sujet de technologie ; les textes sont diffusés sur décision du Conseil académique.
- une collection sous **couverture jaune**, intitulée « **Grandes aventures technologiques françaises** », de contributions apportées par des académiciens à l'histoire industrielle ; les textes sont diffusés sur décision du Conseil académique.

Ceux précédés d'un astérisque (*), parmi les travaux académiques rappelés *in extenso* ci-après, sont publiés ou en cours de publication. Les autres textes sont mis en ligne sur le site public : <http://www.academie-technologies.fr>

Avis et rapports de l'Académie :

1. *Brevetabilité des inventions mises en œuvre par ordinateurs : Avis au Premier ministre, juin 2001.*
2. *Analyse des cycles de vie, oct. 2002.*
3. *Le gaz naturel, oct. 2002.*
4. *Les nanotechnologies : enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche, déc. 2002.*
5. *Les progrès technologiques au sein des industries alimentaires - Impact sur la qualité des aliments/1. La filière lait, mai 2004*
6. *Note complémentaire au premier avis transmis au Premier ministre, juin 2003.*
7. *Quelles méthodologies doit-on mettre en œuvre pour définir les grandes orientations de la recherche française et comment, à partir de cette approche, donner plus de lisibilité à la politique engagée ? déc. 2003.*
8. *Les indicateurs pertinents permettant le suivi des flux de jeunes scientifiques et ingénieurs français vers d'autres pays, notamment les États-Unis, déc. 2003.*
9. *Recenser les paramètres susceptibles de constituer une grille d'analyse commune à toutes les questions concernant l'énergie, déc. 2003.*
10. *Premières remarques de l'Académie des technologies à propos de la réflexion et de la concertation sur l'avenir de la recherche lancée par le ministère de la Recherche, mars 2004.*
11. **Métrologie du futur, mai 2004*
12. *Le système français de recherche et d'innovation - Vue d'ensemble du système français de recherche et d'innovation + Annexe 1 : La gouvernance du système de recherche ; Annexe 2 : Causes structurelles du déficit d'innovation technologique. Constat, analyse et proposition, juin 2004.*
13. ** Interaction Homme-Machine, oct. 2004.*
14. *Avis sur l'enseignement des technologies de l'école primaire aux lycées, sept. 2004.*
15. **Enquête sur les frontières de la simulation numérique, juin 2005.*
16. *Avis sur l'enseignement supérieur, juillet 2007.*
17. **Le patient, les technologies et la médecine ambulatoire, avril 2008*

Communications à l'Académie:

1. Commentaires sur le Livre Blanc sur les énergies, janv. 2004.
2. *Prospective sur l'énergie au XXI^e siècle, synthèse de la Commission Énergie & Environnement, avril 2004, mise à jour déc. 2004.
Monographies dans le cadre de la Commission E & E :
 - « Charbon, quel avenir? », décembre 2003
 - « Gaz naturel », décembre 2003
 - « Énergie hydraulique et énergie éolienne », novembre 2005
 - « Les filières nucléaires aujourd'hui et demain », mars 2005
 - « La séquestration du CO₂ », décembre 2005
 - « Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre », août 2003
 - « Le cycle du carbone », août 2003
 - « Les émissions humaines », août 2003
 - « Facteur 4 sur les émissions de CO₂ », mars 2005
 - « Économies d'énergie dans l'habitat », août 2003
 - « Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut? », mars 2007
3. Pour une politique audacieuse de recherche, développement et d'innovation de la France, juillet 2004.
4. *Les TIC : un enjeu économique et sociétal pour la France, juillet 2005.
5. *Des relations entre entreprise et recherche extérieure, novembre 2007
6. *PME, technologie et recherche, juin 2007
7. *Les perspectives de l'énergie solaire en France, juillet 2008

Dix questions:

1. Les véhicules hybrides – 10 questions proposées par François de Charentenay, déc. 2004.
2. *Les déchets nucléaires – 10 questions proposées par Robert Guillaumont, déc. 2004.
3. *L'avenir du charbon – 10 questions proposées par Gilbert Ruelle, janvier 2005.
4. *L'hydrogène – 10 questions proposées par Jean Dhers, janvier 2005.
5. *Relations entre la technologie, la croissance et l'emploi – 10 questions proposées par Jacques Lesourne, mars 2007.
6. *Stockage de l'énergie électrique - 10 questions proposées par Jean Dhers, décembre 2007

Grandes aventures technologiques:

1. *Le Rilsan - par Pierre Castillon, oct. 2006.

Avertissement

Le fait que les publications de l'académie des technologies soient regroupées en 4 collections distinctes découle d'un classement interne des textes par les instances académiques.

*En effet, les **avis et rapports de l'académie** engagent celle-ci, dès lors que les textes, préalablement visés par le Comité de la qualité, ont été soumis à débat et à un vote par l'Assemblée. Les Avis constituent des réponses de l'Académie à des saisines d'autorités, notamment gouvernementales et ne sont publiés qu'avec l'accord des destinataires.*

*Les **communications à l'académie**, d'une part, font l'objet de présentations à l'Assemblée et de débats, d'autre part, sont visées par le Comité de la qualité; elles ne sont pas soumises à un vote et il revient au Conseil académique de décider de l'opportunité d'une publication. Ces textes engagent la seule responsabilité de leurs auteurs.*

*Les **annexes des rapports et des communications**, visées également par le Comité de la qualité, sont signées et engagent la seule responsabilité de leurs auteurs (souvent des experts non membres de l'Académie) qui peuvent en disposer. Elles sont réunies, le plus souvent, avec les corps de texte votés afin de constituer des publications complètes et à jour au moment d'être mises sous presse.*

Le lecteur est toutefois invité à visiter le site Internet de l'Académie <http://www.academie-technologies.fr> où apparaissent non seulement tous les textes votés, les Communications, les « Dix questions » et la série « Grandes aventures technologiques françaises » mais aussi des textes qui ne font pas (ou pas encore) l'objet d'une publication dans l'une ou l'autre des 4 collections.

Les travaux de l'Académie se poursuivant sur certaines thématiques, des versions plus récentes de textes et/ou d'annexes sont régulièrement mises en ligne.

Préface

Dès sa création le 12 décembre 2000, l'Académie des technologies s'est engagée à réfléchir aux grands défis du ^{xxi} siècle, nécessitant l'apport des technologies pour la satisfaction des besoins de l'humanité. Au premier rang de ces derniers figure la fourniture d'énergie, condition essentielle de la croissance économique, du développement des échanges et de l'amélioration de la qualité de vie et de la santé du plus grand nombre.

Depuis 2001, l'Académie s'est donc penchée activement sur ce défi et les réponses possibles, au sein d'une Commission permanente intitulée « Energie et Changement Climatique » afin d'insister d'emblée sur les liens évidents entre les solutions énergétiques et les questions environnementales, sans oublier pour autant les aspects économiques.

Une dizaine de Groupes de Travail (GT) spécialisés au sein de la Commission, faisant également appel à des experts extérieurs à l'Académie, ont abordé le problème sous différents angles, notamment en analysant chaque besoin et chaque mode de production.

Certains de ces Groupes ont présenté leurs rapports d'étape lors de séances plénières, d'autres ont contribué à l'établissement d'une vaste base de données disponible pour les réflexions futures de l'Académie et préparant une vision d'ensemble.

L'année 2003 a donné lieu en France à un Débat national sur les énergies, qui associa l'Académie à plusieurs niveaux, y compris celui d'un Comité des sages. L'accent fut mis, dans ce débat, sur l'analyse de la demande et de ses évolutions possibles et permit d'insister sur la priorité à donner aux économies d'énergie.

Dès lors, l'Académie était en mesure de présenter en 2004 une première synthèse de trois années de travail, fournissant des visions à moyen terme (2020-2030) et à plus long terme (au-delà de 2050), se plaçant au niveau de la planète.

Ces visions prenaient en compte la progression inéluctable des besoins des pays en développement, la nécessaire révision des politiques énergivores des pays développés, les perspectives de raréfaction et de hausse des prix des ressources fossiles, les risques environnementaux liés à chaque source d'énergie et les mécanismes mis en place au niveau mondial pour freiner l'évolution de l'effet de serre. Elles conduisaient à un ensemble de propositions sur la consommation et sur un bouquet énergétique combinant toutes les sources actuelles, dans l'attente d'innovations à venir.

De 2004 à 2007, l'Académie a affiné son projet, tout en participant à plusieurs étapes de réflexion nationale :
préparation d'un texte sur la méthodologie à l'attention du ministère chargé de la Recherche ;
Groupe de travail pluridisciplinaire sur les Nouvelles technologies énergétiques ;
Groupe de travail du Centre d'analyses stratégiques du Premier ministre,
document préparé pour le « *Grenelle de l'environnement* ».

Le présent rapport de synthèse ne prétend pas apporter de réponse définitive, mais constitue, avec son millier de pages annexes, une base de données à consulter pour avancer dans la réflexion sur ces questions très complexes et souvent diversement perçues par le public.

En appliquant sa devise « *Pour un progrès raisonné, choisi et partagé* », l'Académie s'est intéressée aux approches des différents pays, à l'échelle des risques, aux priorités de recherche, aux soutiens nécessaires aux pistes prometteuses, aux bilans économiques globaux.

Ce travail interdisciplinaire, associant des visions diverses du futur, répond bien à la mission première de l'Académie, s'interroger sur la meilleure adéquation des technologies à l'Homme, tout en contribuant au développement durable.

Pierre CASTILLON

Président-fondateur de l'Académie des technologies [2000-2002]
Membre du Comité des sages du Débat national sur les énergies [2003]

Organisation du rapport

Cette synthèse des travaux de la Commission Energie et Changement Climatique (CE & CC) est un résumé. L'intérêt d'un résumé est qu'il est vite lu, son inconvénient est que, plus il est court, plus il peut se prêter à des interprétations divergentes.

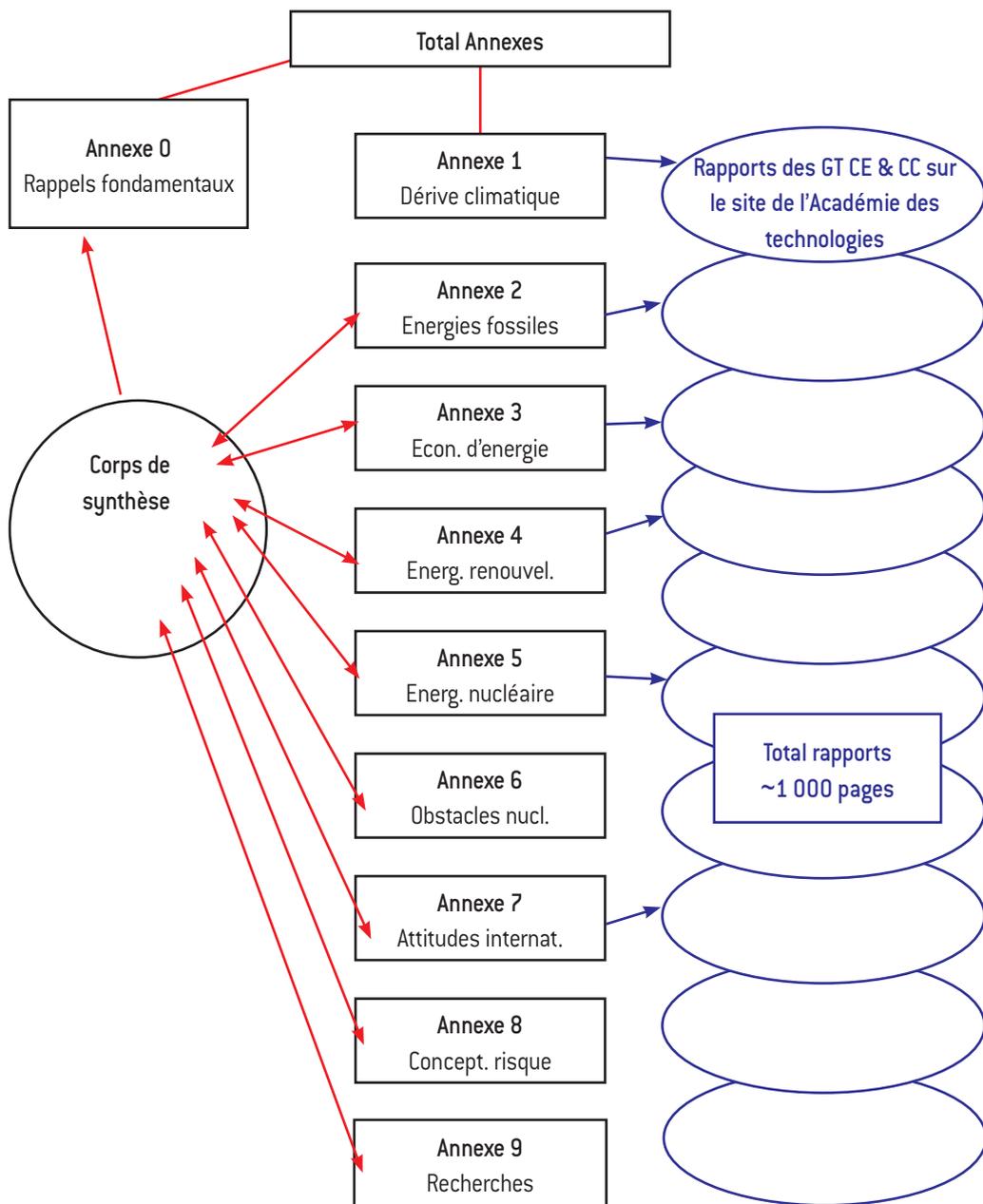
L'ensemble des rapports de la CE & CC comportant environ 1 000 pages, un résumé était indispensable, mais pour éviter des distorsions par rapport au contenu de chaque rapport, le taux de condensation du résumé ne doit pas être trop sévère, sous peine de manque de fidélité.

C'est pourquoi nous avons retenu dans ce travail plusieurs taux de condensations en cascade, permettant : **3 niveaux de lecture** représentés sur le schéma ci dessous, selon le degré de détail recherché par le lecteur :

N1 : Il suffit de sauter les renvois aux Annexes 0 à 9 (**en rouge**)

N2 : Lecture un peu plus approfondie, en lisant les 9 annexes **indiquées par les flèches rouges**.

N3 : En fin de chaque annexe figure un **renvoi manuel bleu** aux rapports affichés sur le site de l'Académie des technologies (<http://www.academie-technologies.fr>), permet d'accéder aux rapports sectoriels principaux et leurs annexes, plus détaillés que dans les annexes de cette synthèse (**flèches bleues du schéma**).



Coordination des études et rédaction du rapport:

Gilbert Ruelle, Président de la Commission « CE & CC »

Ont contribué à ces études :

Groupes de travail ayant mené les études thématiques d'où est extraite cette synthèse et leurs animateurs (en caractères gras) :

Le charbon : **A. Darthenay, G. Ruelle**, M. Athimon, M. Benech, P-H. Bourrelier, D. Decrooq, D. Moreau et X. Morin,

Le gaz naturel : **P. Bacher**, P-R. Bauquis, P. Castillon, M. Claverie et P-N. Giraud.

Le pétrole : **D. Babusiaux, P-R. Bauquis**, P. Castillon, X. Prél, P. Sigoney et B. Tissot

Que peut-on faire contre le CO₂ ? : **F. Mudry, R. Ducroux**, P. Jeanbaptiste,

Les économies et substitutions d'énergie : **A. Mongon**, P. Caseau, F. de Charentenay, J. Dhers, M. Frybourg, J-M. Jancovici, G. Mordchelles-Régnier, J. Orselli, M. Panet, M. Poulain et E. Quinet.

Les énergies renouvelables : **B. Tardieu, M. Claverie**, M. Girard, B. Jarry (pour la biomasse), J. Varet (pour la géothermie), Y. Maigne, J-P. Causse, M-L. Chanin, A. Mongon (pour le solaire).

Les filières nucléaires d'aujourd'hui et de demain : **P. Bacher**, P. Caseau, R. Guillaumont et A. Mongon

Le facteur 4 en 2050 : Travail global de la Commission, animation P. Bacher

Les vecteurs d'énergie : (regroupe Piles à combustible, filière hydrogène, stockage de l'énergie électrique) **J. Dhers, L. Debiais**, P. Caseau et G. Ruelle.

La révolution des vecteurs d'énergie liée au facteur 4 : **P. Bacher, P. Caseau, J. Dhers, L. Debiais** et G. Ruelle,

Les membres de la Commission Energie & Changement Climatique (2008):

Premier cercle

Membres de l'Académie : Paul Caseau, Jean-Pierre Causse, Pierre Castillon, François de Charentenay, Jean Dhers, Pierre Fillet, Michel Frybourg, Robert Guillaumont, Bruno Jarry, Yves Maigne, Alain Mongon, François Mudry, Marc Pélegrin, Michel Pouchard, Gilbert Ruelle, Bernard Tardieu et Bernard Tissot.

Experts extérieurs : Denis Babusiaux, Pierre Bacher, Pierre-René Bauquis, Patrice Béraud-Dufour, Paul-Henri Bourrelier, Gérard Choux, Maurice Claverie, Alain Darthenay, Daniel Decroocq, Louis Debiais, René Ducroux, Bernard Equer, Michel Girard (représentant l'Académie d'Agriculture de France) and Jean Orselli.

Deuxième cercle

Membres de l'Académie : Jean-Claude André, Yves Bamberger, Christian Bordé, Alain Boudet, Sébastien Candel, Pierre Galle, Antoine Gaset, Pierre-Noël Giraud, Gérard Grunblatt, **Philippe Jeanbaptiste**, Jean Lunel, Ghislain de Marsily, Roland Masse, Jean-François Minster, Georges Mordchelles-Régnier, Marc Panet, Michel Poulain, Emile Quinet, Michel Rondreux et Georges Slodzian.

Experts extérieurs : Michel Benech, André Douaud, Jean-Charles Hourcade, Jean-Marc Jancovici et Xavier Morin.

Liste des membres de la Commission Energie & Changement Climatique (2007):

Premier cercle

Membres de l'Académie : Paul Caseau, Pierre Castillon, François de Charentenay, Jean Dhers, Michel Frybourg, Robert Guillaumont, Bruno Jarry, Yves Maigne, Alain Mongon, Georges Mordchelles-Régnier, François Mudry, Marc Panet, Marc Pélegrin, Michel Pouchard, Michel Rondreux, Gilbert Ruelle, Bernard Tardieu, Bernard Tissot.

Experts extérieurs : Pierre Bacher, Pierre-René Bauquis, Paul-Henri Bourrelier, Maurice Claverie, Alain Darthenay, Daniel Decroocq, Louis Debiais, René Ducroux, Bernard Equer, Michel Girard (représentant l'Académie d'Agriculture de France), Philippe Jeanbaptiste et Jean Orselli.

Deuxième cercle

Membres de l'Académie : Jean-Claude André, Sébastien Candel, Pierre Galle, Pierre-Noël Giraud, Ghislain de Marsily, Roland Masse, Jean-François Minster, Michel Poulain, Emile Quinet et Georges Slodzian.

Experts extérieurs : Denis Babusiaux, Michel Benech, André Douaud, Jean-Charles Hourcade, Jean-Marc Jancovici et Xavier Morin.

Glossaire

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique (siège à Vienne), IAEA en anglais

AM : Actinides mineurs

BNFL : British National Fuel Ltd. (équivalent en Grande Bretagne de la Cogema)

BT : Basse Tension

BTU : British Thermal Unit

CANDU : Réacteur de la filière canadienne à eau lourde – acronyme pour CANada Deuterium Uranium

CE : Communauté européenne

CE & E : Commission Energie et Environnement

CGH2 : Compressed Gaz Hydrogen, Hydrogène gazeux comprimé

DGEMP : Direction Générale de l'Energie et des Matières Premières

DOE : Department of Energy, Etats-Unis

EMHV : Esters Méthyliques d'Huiles Végétales

EnR : Energies Renouvelables, EnRé : énergie renouvelable électrique

EPR : European Pressurised Reactor

ESKOM : Compagnie d'électricité nationale d'Afrique du sud

ETBE : Ethyltertiobutylether

FOD : Fioul domestique

Formules chimiques : C carbone, CH₄ méthane, CO monoxyde de carbone, CO₂ dioxyde de carbone, H₂ hydrogène, NO_x : oxydes d'azote divers (x), UO₂ : dioxyde d'uranium, SO₂ : dioxyde de soufre.

GES : Gaz à Effet de Serre (en anglais GHG = Green House Gases)

GIEC : Groupement International des Experts en Climat (en anglais IPCC = International Panel on Climate Change)

Grandeurs physiques : km kilomètre, kWh kilowatt-heure, kWhé kilowatt-heure électrique, kWhth kilowatt-heure thermique, m masse, v vitesse

GT : Groupe de Travail de l'Académie des technologies

HFC : Hydrofluorocarbones

HT : Haute Tension

HTR (terme anglais) : Réacteur à haute température (High temperature Reactor)

IGCC (terme anglais) : cycle combiné à gazeification intégrée (Integrated Gazeification Combined Cycle)

IPSN : Institut de Prospective et de Sûreté nucléaire (CEA)

IRSN : Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire

LH2 : Liquid Hydrogen = hydrogène liquéfié

MDP : Mécanisme de Développement Propre

MOC : Mise en Œuvre Conjointe

MOX : Combustible oxyde mixte d'uranium et de plutonium

OCDE : Organisation pour la Coopération et le Développement Economique (OECD en anglais)
OGM : Organisme génétiquement modifié
OMS : Organisation Mondiale de la Santé
ONG : Organisation Non-Gouvernementale
OPECST : Office Parlementaire d'Evaluation des Choix Scientifiques et Technologiques
PAC : Pile à Combustible
PEMFC : (en anglais Proton Exchange Membrane Fuel Cell), Piles à combustible ayant pour électrolyte des membranes polymères
PBMR : Pebble Bed Reactor (un modèle de réacteur HTR)
PF : Produits de Fission
PFC : Poly fluoro carbone
PIB : Produit Intérieur Brut
PNUE : Programme des Nations Unies pour l'Environnement
Pu : L'élément Plutonium et ses isotopes ^{239}Pu et ^{241}Pu
PVD : Pays en Voie de Développement
R & D : Recherche et Développement
RBMK : réacteur nucléaire de modèle soviétique [acronyme pour 'reaktor bolsшой moshchnosti kanal-niy' (en russe)]
REB (en anglais BWR) : Réacteur à Eau Bouillante (Boiling Water Reactor)
REP (en anglais PWR) : Réacteur à Eau Pressurisée (Pressurised Water Reactor)
RNR (en anglais FBR) : Réacteur à Neutrons Rapides (Fast Breeder Reactor)
RSA : République d'Afrique du sud
SICAT : Système d'Information et de Communication de l'Académie des Technologies (intranet)
SPA (en anglais ADS) : système assisté par accélérateur de particules (Accelerator Driven System)
U : Uranium et ses isotopes ^{238}U , ^{235}U et ^{233}U
UE (en anglais EU European Union) : Union européenne
UK : United Kingdom
UNGG : Uranium Naturel Graphite Gaz
Unités : c€ centime d'Euro, g gramme, k kilo (10^3), M Méga (10^6), G Giga = 10^9 T Téra (10^{12}), ha hectare, ppmv partie par million en volume, S Sievert (mS = millisievert), tep (en anglais toe) tonne d'équivalent pétrole (ton of oil equivalent) = 4,5 MWh, V Volt, ppmv partie par million en volume, W watt (1MWh = 0,222 tep), Wc watt crête
UNSCEAR : United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations
VHTR : Very High Temperature Reactor = réacteur à très haute température

Table des matières

Préface	5
Organisation du rapport	7
Ont contribué... ..	9
Glossaire	11
Introduction	17
1. La problématique	19
1.1 Visions sur l'énergie et l'environnement	19
1.2 Problématique « développement – énergies fossiles – pollution »	20
1.2.1 Quel est le problème ?	20
1.2.2 Doit-on s'inquiéter de cette envolée de la consommation d'énergie ?	20
1.2.3 Des risques de cette envolée de consommation apparaissent déjà	21
1.2.4 Comment extrapoler les courbes de la figure 4 vers la fin du ^{xx} e siècle ?	24
1.3 L'avenir sera sous contrainte	25
2. Les énergies fossiles	27
2.1 Pourquoi cette boulimie ? Que nous réserve l'avenir ?	27
2.2 Le Charbon.	29
2.3 Le Pétrole	30
2.4 Le Gaz naturel	30
2.5 Perspectives d'actions physiques possibles contre le CO ₂	30
3. Les économies d'énergie	33
3.1 Les économies d'énergie dans l'habitat	34
3.2 Les économies d'énergie dans les transports	35
3.3 La maîtrise de l'énergie peut-elle « produire » suffisamment de « négateps » pour résoudre les problèmes énergétiques ?	36
4. Le remplacement du pétrole dans les transports	39
5. Les énergies renouvelables (EnR)	41
5.1 Leurs caractéristiques	41
5.2 Attitudes diverses, énergies dominantes et dépendantes	42
5.3 Tentative de pronostic sur les EnR	43
5.4 Des recommandations ?	45

6. L'énergie nucléaire	47
6.1 Les peurs du nucléaire	47
6.2 Les scénarios du nucléaire	47
7. Synthèse de la prospective énergétique	49
7.1 Portrait d'une énergie idéale	49
7.2 Impact sur la santé publique des différentes sources d'énergie	50
7.3 Risques et atouts des différentes sources d'énergie	50
8 Les attitudes internationales	55
8.1 Les tendances	55
8.2 Les contradictions européennes	56
8.3 Une relance de l'énergie nucléaire sera-t-elle nécessaire ?	57
8.4 Les accords internationaux et les négociations en évolution	58
9. Les outils d'une réflexion prospective sur l'énergie	59
9.1 Une conception équilibrée du risque	59
9.2 Une pensée éthique	60
9.3 Après la réflexion, la décision	61
10. Recherches qui influenceront la prospective	63
11. Conclusions	65

TABLE ANNEXES

Annexe 0 – Quelques rappels fondamentaux	69
0.1 Rappels sur l'énergie	69
0.1.1 L'énergie d'un système	69
0.1.2 L'entropie d'un système	70
0.1.3 Commentaire supplémentaire pour les philosophes	72
0.2 Rappel sur l'effet de serre (résumé)	73
0.3 Rappel sur la radioactivité (résumé)	73
Annexe 1 – La dérivation climatique	77
Annexe 2 – Les énergies fossiles	81
2.1 L'avenir pour le charbon ?	81
2.2 Le pétrole et ses contradictions	84

2.3 La séduction du gaz naturel	88
2.4 Un regard transversal : que peut-on faire contre le CO ₂ ?	90
2.4.1 Stockage naturel du CO ₂ . Les flux du carbone	92
2.4.2 Stockage artificiel du CO ₂	93
2.4.3 Quel est (et que pourra devenir) le coût du stockage souterrain ?	94
2.4.4 Risques du stockage souterrain du CO ₂	94
Annexe 3 – Les économies d'énergie	97
3.1 L'énergie dans le bâtiment	97
3.2 L'énergie et les transports routiers	100
3.2.1 Constat sur les évolutions actuelles	101
3.2.2 Les perspectives à long terme	103
3.2.3 Conclusions sur les transports	104
3.3 Que faire pour accélérer les économies d'énergie ?	105
Annexe 4 – Les énergies renouvelables	107
4.1 L'énergie hydraulique	107
4.2 L'énergie éolienne	110
4.3 L'énergie de la biomasse	113
4.3.1 La combustion, le bois-énergie	114
4.3.2 La méthanisation, le biogaz	115
4.3.3 Les biocarburants	115
4.3.4 Ordre de grandeur du potentiel de la biomasse	119
4.4 Énergie solaire	120
4.4.1 Le solaire thermique	121
4.4.2 Le solaire thermodynamique	122
4.4.3 Le solaire photovoltaïque	123
4.4.4 Quelques autres voies expérimentales	125
4.5 L'énergie géothermique	125
4.6 Impact des sources d'énergie réparties sur un réseau de distribution	126
Annexe 5 – L'énergie nucléaire	129
5.1 Les réacteurs éprouvés	129
5.2 Évolution des trois familles de réacteurs éprouvés	130
5.2.1 Les réacteurs à eau modernes (Génération III)	130
5.2.2 Les RNR et HTR	130
5.2.3 Le coût du kWh nucléaire avec les filières assises sur l'expérience	131
5.3 Les systèmes nucléaires	132
5.4 Apparition des réacteurs de Génération IV	132
5.5 La question du plutonium	134

Annexe 6 – Analyse des obstacles au nucléaire	135
6.1 La crainte des radiations	135
6.2 La crainte des accidents et attentats	136
6.2.1 Quels sont les principes de sûreté limitant les conséquences des accidents	136
6.2.2 Les causes de l'accident de Tchernobyl	137
6.2.3 Les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl	138
6.3 La crainte des déchets	139
6.3.1 Principes de la gestion des déchets	139
6.3.2 Le débat sur le retraitement des déchets nucléaires	141
6.3.3 Le débat sur la transmutation	142
6.3.4 La gestion proche des déchets en France	143
6.3.5 La gestion à longue durée : problèmes spécifiques de chaque période de gestion	143
6.3.6 En résumé	144
6.4 Les risques de prolifération	145
6.5 Le coût	146
6.6 Le risque de perte de compétence	146
Annexe 7 – Négociations internationales	149
7.1 Les voies réglementaires et les autres	149
7.2 Les négociations internationales	149
7.3 Effets vertueux et pervers possibles des politiques tarifaires et fiscales	153
7.3.1 Des permis échangeables pour la lutte contre les gaz à effet de serre	154
Annexe 8 – Une conception équilibrée du risque	157
8.1 Pourquoi accepte-t-on des risques ? et dans quelles limites ?	157
8.2 Le public a-t-il une conception équilibrée du risque ?	159
Annexe 9 – Recherches influençant la prospective. Vecteurs d'énergie	163
9.1 Meilleure exploitation des énergies primaires	164
9.2 Les vecteurs d'énergie	164
9.2.1 Le vecteur électrique	164
9.2.2 Le vecteur hydrogène	165
9.2.3 Le vecteur chaleur	171
9.3 Les nouvelles utilisations de l'énergie	172
9.3.1 La production de biocarburants	172
9.3.2 La production d'hydrogène	172
9.3.3 La capture du CO ₂	172
9.3.4 La pile à combustible (PAC)	172
9.4 Les nouvelles sources d'énergie	173
Bibliographie sommaire	175

Introduction

Cette étude, qui s'adresse aussi bien au citoyen soucieux de s'informer qu'aux divers échelons de décision, a pour objectif d'apporter les éléments d'information nécessaires à une évaluation correcte de la problématique de l'énergie au cours de ce siècle. Elle est une synthèse condensée des études thématiques de la Commission Energie et Changement Climatique (CE & CC), dont les rapports sont donnés en référence dans le cours du texte.

Cette problématique dépend fortement de l'**échelle de temps** à laquelle on se place. On distinguera fréquemment trois périodes approximatives au cours du siècle :

- ✓ Le **court terme (2020#2030)**, caractérisé à la fois par l'abondance des différentes énergies et par l'inertie des systèmes énergétiques qui interdit de fait des changements importants (hors crise majeure du type choc pétrolier des années 1970, difficilement prévisible). Cette première période se prête assez bien aux prévisions (cf. Le Livre Vert de la Commission européenne).
- ✓ Le **moyen terme (#2050)**, échéance à laquelle, d'une part, la production de pétrole sera vraisemblablement en baisse, d'autre part, échéance suffisamment éloignée pour que des inflexions notables aient pu avoir lieu (démographie, politique de maîtrise de l'énergie, progrès technologiques...). Il est quasi-impossible de faire des prévisions à une telle échéance, mais il demeure possible de conduire des études prospectives avec des scénarios cohérents.
- ✓ Le **long terme (seconde moitié du siècle)** pour lequel peuvent commencer à intervenir des évolutions technologiques provenant, soit des domaines déjà explorés (fusion contrôlée), soit des domaines encore ignorés. Une première préoccupation est de chercher à identifier les domaines de recherche les plus prometteurs, mais la méthode des scénarios devient très aléatoire, car à cet horizon les politiques déjà mises en application à court et moyen terme peuvent avoir induit des irréversibilités (choix d'équipements lourds durables, aménagement du territoire, épuisement des énergies fossiles, changement climatique) et on ne peut éluder d'avoir à tirer les conséquences des politiques actuelles à ce terme.

La problématique dépend également très fortement de la **situation régionale** : la disponibilité plus ou moins grande des ressources d'énergie locales et le niveau de développement jouent sur l'ordre de mérite attribué aux différentes énergies, de même que, dans une certaine mesure, de facteurs culturels. Face à de telles différences, il pourrait être tentant de se limiter au cas de la France, ou à la rigueur de l'Europe. Ce n'est malheureusement pas possible car **beaucoup d'aspects de l'énergie sont à l'évidence mondiaux**, comme l'état des ressources de pétrole et de gaz naturel et les risques climatiques liés aux gaz à effet de serre.

Trop schématiquement sans doute, quatre groupes de pays considérés comme typiques à tel ou tel titre seront examinés : l'Amérique du Nord, les pays de l'OCDE hors Amérique du Nord, les grands pays émergents (Chine, Inde, Brésil), les pays pauvres (d'Afrique, d'Asie du Sud, d'Amérique du Sud).

On adoptera comme guide tout au long de ce rapport le principe de précaution tel qu'il est défini dans la loi sur l'environnement 95-101¹, selon lequel « *L'absence de certitude concernant un danger ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées* » (principe que nous appellerons de « précaution proportionnée » pour faire court).

On s'efforcera à chaque étape de qualifier les différentes options énergétiques au regard de quatre critères d'évaluation reflétant l'objectif d'un développement durable, les 4E :

Les 4E

Equité : visant l'accès de tous les peuples et de tous les hommes à l'énergie.

Environnement : permettant la protection de l'environnement et de la santé publique.

Ethique : reflétant le souci de léguer à nos descendants une planète dans un état au moins aussi bon que celui dans lequel nous l'avons reçue, en vue notamment, dans le domaine de l'énergie, d'un développement durable.

Economie : terme de bouclage intégrant l'ensemble des autres facteurs, notamment la rareté ; il joue un rôle prépondérant au niveau de chaque pays pour définir l'ordre de mérite attribué à chaque énergie.

Dans la rubrique environnement-santé publique, l'étude essaie de **délimiter les zones de doutes** légitimes qui planent dans l'esprit du citoyen au sujet des risques attachés à l'exploitation de chaque type d'énergie, soit par manque de culture scientifique, soit par manque d'information, soit parfois par désinformation, en procédant à une analyse des données permettant une meilleure appréciation de ces risques.

L'objectif final est de distinguer, au niveau de la France, comme aux niveaux européen et mondial, les conditions permettant dans le respect de ces critères :

- ✓ d'assurer un approvisionnement en énergie à un coût raisonnable, fiable, et compatible avec la poursuite du développement économique ;
- ✓ de contribuer le plus fortement possible à la protection du climat par la maîtrise des rejets de CO₂ ;
- ✓ de participer à la réduction de la fracture entre pays riches et pays en développement dans le domaine de l'énergie.

1. Cf. loi N° 95-101, 1995 sur www.legifrance.gouv.fr.

1. La problématique

1.1 Visions sur l'énergie et l'environnement

La croissance de la consommation d'énergie induit, au cours même de ce siècle, des problèmes de disponibilité de l'énergie et de dégradation de notre environnement. Malgré une information de plus en plus disponible, une partie du public en est encore peu consciente, car l'énergie est encore abondante et à un prix encore accessible : il y a du courant à la prise électrique, de l'essence à la pompe et la limitation annoncée des réserves de pétrole à 40 années étant la même depuis 40 ans ne semble pas crédible à tous. Le citoyen perçoit qu'il y a un problème mais a peut-être du mal à s'y retrouver dans l'information abondante et/ou contradictoire des médias.

On s'est habitué depuis longtemps à certains impacts néfastes du développement énergétique sur l'environnement et la santé publique, perçus comme des rançons du progrès.

Certains sont bien connus : les centaines de milliers de morts cumulés dans les accidents des mines de charbon et les maladies pulmonaires des mineurs, les dizaines de milliers de morts cumulés par ruptures de barrages, explosions de gaz, etc. D'autres sont moins connus : un million de morts par an en Inde attribuables à l'usage particulier de la biomasse dans ce pays¹. Plus récemment, un autre impact écologique est apparu de manière répétée : les marées noires des transports pétroliers.

De son côté, le nucléaire reste marqué du sceau de sa première application militaire ; l'accident majeur de Tchernobyl marque aussi toutes les mémoires et la gestion des déchets radioactifs à longue durée de vie est un sujet récurrent d'anxiété et de débat, objectivé par des situations dangereuses comme celles créées par les sites pollués de la vallée de la Techa en Russie ou de Hanford aux Etats-Unis, sujet d'anxiété d'autant plus vif que la radioactivité reste un sujet mystérieux et peu accessible.

Aucune énergie n'est sans risque. Les doutes sur les degrés respectifs de risque dans l'exploitation des différentes sources primaires d'énergie sont légitimes, le doute est la base même de la science, mais il est souhaitable que le citoyen puisse délimiter ces zones de doute, et c'est encore la science qui y contribue.

Dans une société de plus en plus sûre, les risques résiduels sont de moins en moins tolérés. Une partie de la population, largement citadine, rêve d'un monde propre et écologique ; elle est

1. Conférence de M. Olivier Appert, président de l'Institut Français du Pétrole (IFP) au « Club Prospective 2100 », 10 octobre 2003.

séduite par les énergies renouvelables, car elle entend de plus en plus parler de développement durable et d'un risque mondial : le réchauffement de la planète. Mais l'effet de serre et la dérive climatique qu'il induit ne sont pas encore réellement tangibles. Il arrive encore, bien que de plus en plus rarement, que sa principale origine anthropique soit mise en doute. Les très sérieux rapports du GIEC2 sont méconnus du grand public et les gouvernements des divers pays - aux prises avec beaucoup d'autres problèmes - démontrent par leur manque d'unanimité sur les actions à mener pour protéger la planète de la dérive climatique, qu'ils n'accordent pas tous la première priorité à cette question.

La relation entre énergie et environnement planétaire n'est donc pas encore clairement perçue ni par le public ni par le citoyen.

- ✓ **Le lecteur qui estime manquer de la culture scientifique nécessaire pour aborder ce rapport pourra avantagement commencer sa lecture par l'Annexe 0, où sont regroupés quelques rappels utiles à la compréhension de la suite du Rapport.**

1.2 Problématique : « développement – énergies fossiles – pollution »

1.2.1 Quel est le problème ? : La consommation d'énergie s'envole,

- parce que la population mondiale est passée de 1 à plus de 6 milliards en 200 ans et frôlera les 8 milliards vers 2020, l'augmentation venant essentiellement des pays en développement ;
- parce que les hommes sont devenus de plus en plus gourmands en énergie : au cours de la seconde moitié du vingtième siècle, alors que la population mondiale a plus que doublé, la consommation mondiale d'énergie a plus que quadruplé.

1.2.2 Doit-on s'inquiéter de cette envolée de la consommation d'énergie, alors que la plupart de ses conséquences ont jusqu'alors été positives pour l'humanité ?

L'accès à l'énergie est un facteur de prospérité. Le PIB mondial a été multiplié par 16 entre 1900 et 2000. La figure 1, qui indique le PIB par habitant de quelques pays en fonction de la consommation énergétique individuelle, est assez parlante à cet égard.

2. Groupement International des Experts en Climat. IPCC en anglais (International Panel on Climatic Change).

Figure 1

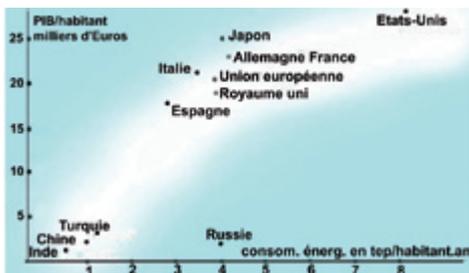
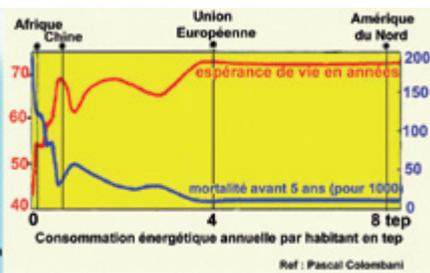


Figure 2



L'accès à l'énergie améliore le confort, la qualité de vie et la santé publique. La figure 2 ci-dessus montre l'évolution de l'espérance de vie et de la mortalité infantile, en fonction de la consommation d'énergie par habitant. C'est une évidence que le chauffage de l'habitat en hiver, la chaîne du froid garantissant une alimentation saine en été, entre autres, font aller de pair la santé publique et la consommation d'énergie. Cette figure 2 indique aussi que l'énergie n'est, bien entendu, pas le seul facteur intervenant (cf. le cas de la Chine), mais révèle qu'un accès de tous à un minimum d'énergie, de l'ordre de 0,5 tep/an à 1 tep/an est une exigence éthique. Elle indique enfin qu'entre 4 tep/an (Europe, Japon) et 8 tep/an (Amérique du Nord), on ne perçoit plus de gain sur la santé publique.

Dans son colloque du 25 juin 2003 sur « Choix énergétiques et santé », l'Académie nationale de médecine déclare dans sa première recommandation (extrait) :

« *Le plus grave risque pour la santé publique est de manquer d'énergie* ».

En résumé, l'équité et l'éthique devraient conduire à assurer à tous les hommes :

- ✓ un accès à un minimum d'énergie de 0,5 à 1 tep/an pour des raisons de santé publique ;
- ✓ un accès à environ 1,5 à 2 tep/an pour entrer dans le développement.

À côté de ces aspects positifs de l'accès à l'énergie, certains aspects sont négatifs.

1.2.3 Des risques de cette envolée de consommation apparaissent déjà :

- l'épuisement rapide de certaines énergies fossiles ;
- une interdépendance croissante des différentes zones géographiques pouvant entraîner de nouveaux conflits ;
- l'impact croissant du développement énergétique sur l'environnement.

Examinons rapidement ces points :

a) *L'épuisement rapide des énergies fossiles.*

Depuis que les énergies fossiles sont utilisées, on a toujours craint leur épuisement. Constituant

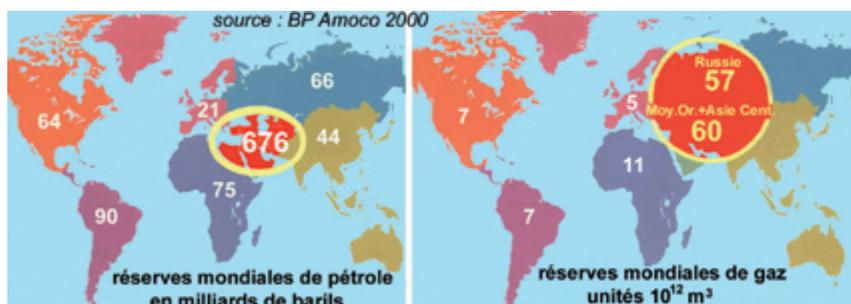
l'essentiel de notre approvisionnement en énergie (80 à 90 %), comment peut-on espérer poursuivre un tel développement de la consommation énergétique, basé sur une ressource qui n'est pas inépuisable ? Au rythme actuel de consommation, les réserves connues de pétrole permettent une quarantaine d'années d'exploitation, les réserves de gaz naturel 60 à 70 ans (sauf exploitation éventuelle des hydrates de méthane), celles de charbon plus de deux siècles. Ces chiffres sont à prendre avec prudence, car la croissance de la consommation réduit la durée des réserves et, à l'inverse, l'amélioration des procédés d'exploration et d'exploitation, toujours sous-estimée dans le passé, les augmente.

La raréfaction des ressources pétrolières devrait se manifester avant le milieu de ce siècle et celle du gaz naturel quelques décennies plus tard. Vers la fin du siècle, en 300 ans depuis l'apparition du développement industriel, l'homme aura consommé la plupart des réserves énergétiques que la nature a façonnées en des centaines de millions d'années. Une telle consommation accélérée des énergies fossiles va à l'encontre de l'éthique du développement durable.

b) L'interdépendance des différentes zones géographiques : des pôles de production et de consommation éloignés géographiquement et culturellement

On ne doit jamais perdre de vue les risques géopolitiques qui pèsent sur le pétrole et le gaz, les 2/3 des réserves de pétrole étant situées au Moyen Orient, et 80 % des réserves de gaz partagées entre le Moyen Orient, l'Asie centrale et le Nord de la Sibérie (Figure 3).

Figure 3



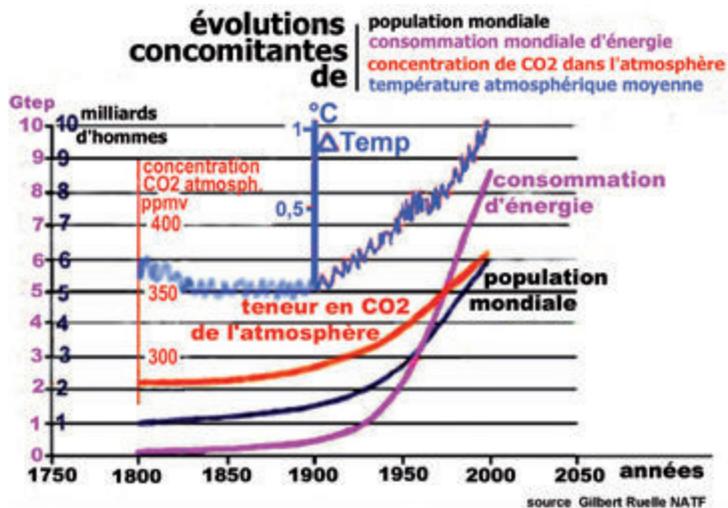
La dépendance énergétique de l'Europe ne fera qu'augmenter, du fait notamment de l'épuisement des ressources de la mer du Nord, passant de 52 % à 85 % de 2000 à 2030. Celle de l'Asie passera de 42 % à 83 %.

La dépendance énergétique croissante des économies des pays développés et des pays émergents les affecte à long terme d'une vulnérabilité également croissante.

Toutes les activités industrielles - et celle de l'énergie n'y échappe pas - ont un impact sur l'environnement que l'on s'est efforcé de réduire avec le progrès technique. Le smog de Londres et les pluies acides en Allemagne et Scandinavie ont été à leur époque des préoccupations majeures ; elles ont été maîtrisées dans les pays développés dès qu'elles ont été identifiées, à Londres par l'abandon du charbon au profit du gaz, pour les pluies acides par des progrès techniques dans les chaudières réduisant les émissions de soufre, avec un coût supplémentaire connu et accepté. De tels problèmes subsistent, toutefois, dans certains pays émergents ou en voie de développement.

Les modes de pollution évoluent avec les sources d'énergie. L'énergie nucléaire, plus récemment développée, suscite de nouvelles craintes relatives à la sécurité et à la gestion des déchets à vie longue. Cependant, l'impact le plus préoccupant actuellement, parce qu'il est mondial et que ses remèdes paraissent beaucoup plus difficiles et longs à mettre en œuvre, est la dérive climatique.

Figure 4



Un réchauffement de la planète est déjà observable, la température moyenne a augmenté de presque 1 °C au cours du vingtième siècle, comme on le voit sur la figure 4 ci-dessus. Les travaux du GIEC depuis sa création en 1990 montrent à travers ses rapports successifs une inquiétude croissante et le dernier rapport de 2007 renforce la quasi-certitude que ce réchauffement est dû essentiellement à l'émission de gaz à effet de serre (GES) liée aux activités humaines, principalement les combustions diverses, surtout celles des combustibles fossiles utilisés pour produire de l'énergie.

On est, en effet, frappé par la similitude des évolutions des quatre courbes de la fig. 4 : population mondiale, consommation d'énergie, taux de CO₂ dans l'atmosphère et réchauffement de l'atmosphère. On y voit que ces quatre courbes prennent leur envolée ensemble au cours de la première

moitié du vingtième siècle et que celle-ci s'accroît dans la seconde moitié. La concentration du CO₂ dans l'atmosphère est passée de 280 ppmv avant l'ère industrielle à 380 en 2007 et la température moyenne de l'atmosphère a augmenté d'environ 1 °C en un siècle.

✓ Pour plus de détails sur le risque climatique, voir Annexe 1.

1.2.4 Comment extrapoler les courbes de la figure 4 vers la fin du XXI^e siècle ?

Par rapport à l'ère préindustrielle (1800), on ne peut pas exclure que :

- la population mondiale soit multipliée par 10 (10 milliards pour 1 milliard) ;
- la consommation individuelle d'énergie soit également multipliée par 10 (1,5 à 2 tep/an par habitant) ;
- la consommation globale d'énergie soit donc multipliée par 100 ;
- la concentration de CO₂ dans l'atmosphère soit doublée ou triplée ;
- le réchauffement planétaire soit compris entre 3 et 5 °C.

a) Comment extrapoler la population mondiale ?

Ce n'est pas, certes, la tâche de l'Académie des technologies - qui ne peut que constater certaines divergences entre les prévisions des démographes - mais la plupart prévoient toutefois que la croissance constatée au cours du XX^e siècle ne se poursuivra pas au-delà de la seconde partie du XXI^e, atteignant un maximum un peu inférieur à 10 milliards de Terriens.

b) Comment extrapoler la consommation d'énergie ?

En limitant la projection à 2050, la demande mondiale d'énergie à cette date est estimée par la plupart des prévisionnistes entre 15 et 20 Gtep/an (pour actuellement environ 10 Gtep), en faisant deux hypothèses :

- un développement économique modéré des pays pauvres (8 milliards, 1,5 à 2 tep/an par habitant) ;
- une forte réduction de la consommation dans les pays riches (1,25 milliard, 3 à 4 tep/an par habitant contre 6 aujourd'hui).

Il est possible que ces valeurs soient atteintes un peu plus tôt (ou un peu plus tard) que 2050 en fonction de la situation économique et des efforts de maîtrise de l'énergie. La rapide croissance économique des grands pays émergents d'Asie pèse déjà sur la consommation d'énergie, particulièrement en pétrole.

c) Comment extrapoler la dérive climatique ?

La lecture de l'Annexe 1 montre qu'une correction de l'effet de serre ne peut intervenir que sur un très long terme, compte tenu des constantes de temps (de l'ordre du siècle) des phénomènes climatiques en jeu. **Une limitation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère à 550 ppmv en 2100 (double de la valeur d'avant l'ère industrielle 280 ppmv) supposerait d'être capable de réduire de moitié les émissions actuelles** malgré l'augmentation attendue de la consommation d'énergie,

ce qui impliquerait de réduire d'ici 2050 d'un facteur 3 à 4 les émissions des pays développés, responsables actuellement de l'essentiel de ces émissions. Cet objectif, extrêmement difficile à atteindre, présente actuellement un caractère plutôt rhétorique, car **85 à 90 % de l'énergie actuellement commercialisée est d'origine fossile (charbon, pétrole, gaz naturel), dont la combustion produit du CO2 qui constitue la cause essentielle de cette dérive climatique.** Les sources d'énergie les moins émettrices de GES, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire, ne contribuent que pour environ 1 Gtep/an sur une consommation mondiale de 10 Gtep. De 1995 à 2005, les énergies renouvelables se sont développées moins vite que les énergies fossiles et resteront insuffisantes à court et moyen terme. Par ailleurs, la production nucléaire étant en stagnation, voire en récession (l'AIEA prévoit une réduction de 360 GW à 320 GW d'ici 2020), **on ne saura pas réduire sensiblement le pourcentage trop élevé des énergies fossiles dans les 20 ou 30 prochaines années.**

Le principe de précaution proportionnée conduit donc à considérer ce risque de dérive climatique comme la donnée fondamentale dans les choix de développement énergétique, car ces choix sont les principaux leviers capables de réguler la machine climatique ; ils constituent le thermostat du climat.

La grande inertie des phénomènes en jeu exige de réagir sans attendre.

1.3 L'avenir sera sous contrainte

La première édition de ce rapport de 2003 annonçait d'ici le milieu de ce siècle **trois contraintes fortes** :

- une augmentation des besoins mondiaux en énergie, très diversifiée selon les pays, posant, entre autres, la question de la vulnérabilité des approvisionnements ;
- une raréfaction sensible et/ou une hausse du prix du pétrole ou de ses substituts, avec des répercussions sur les transports ;
- une accélération de la dérive climatique.

Depuis la parution du rapport GIEC 2007 qui accentue les craintes liées au réchauffement planétaire, l'impératif de la lutte contre ce réchauffement s'impose comme la contrainte numéro un. Or, la surexploitation en cours - et prévisible à court terme - des ressources fossiles résiduelles, accélère le réchauffement climatique. La sagesse devrait donc conduire à en laisser sous terre une partie et à ne plus considérer leur raréfaction comme une motivation à accélérer les recherches d'autres ressources fossiles, mais comme une adaptation nécessaire vers un nouveau panorama de l'énergie où la contrainte climatique sera le déterminant principal à prendre en compte avec la plus grande rigueur, surpassant les idéologies et les choix énergétiques mal-fondés.

Quelles actions peut-on mener pour atténuer cette contrainte croissante ?

- Bien évidemment, économiser et mieux utiliser l'énergie.
- Réduire rapidement les émissions de CO₂ des sources fossiles.
- Capturer et séquestrer rapidement les émissions concentrées de CO₂.
- Développer les énergies émettant peu de GES, en particulier le nucléaire et certaines énergies renouvelables.
- Préparer des substituts au pétrole sans émission de CO₂, ou à émissions très réduites.

Ces actions ont à la fois un impact environnemental et un coût. Elles pourront difficilement être mises en œuvre en l'absence d'accords internationaux, fixant à la fois les objectifs environnementaux et les règles du jeu économique aptes à concilier éthique, équité, environnement et économie et organisant les programmes de recherche nécessaires.

Nous examinerons successivement, dans cette perspective, les énergies fossiles, les économies d'énergie et les énergies ne rejetant pas de gaz à effet de serre (renouvelables et nucléaire), avant de tenter une synthèse.

Pour le plus long terme (fin du siècle) nous examinerons essentiellement les domaines les plus prometteurs au niveau de la recherche.

2. Les énergies fossiles

2.1 Pourquoi cette boulimie ? Que nous réserve l'avenir ?

Pendant longtemps, les hommes ont ignoré le concept d'énergie. Ils utilisaient le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire leurs aliments, fondre les métaux ; ils utilisaient leur propre force physique et celle des animaux domestiqués pour labourer, transporter, l'eau et le vent pour broyer le blé et les olives... Ils ignoraient que la chaleur et le travail étaient deux formes de la même entité : l'énergie.

Puis, après Denis Papin, les Sadi Carnot, J-J. Thomson, James Watt et autres **thermodynamiciens du 19^e siècle ont trouvé comment créer de l'énergie mécanique à partir de la chaleur**. On s'est alors mis à brûler tout ce qui pouvait l'être : bois, charbon, puis pétrole et gaz, pour satisfaire les besoins insatiables d'énergie mécanique qui permirent d'entrer dans l'ère industrielle et le développement économique (figure 5).

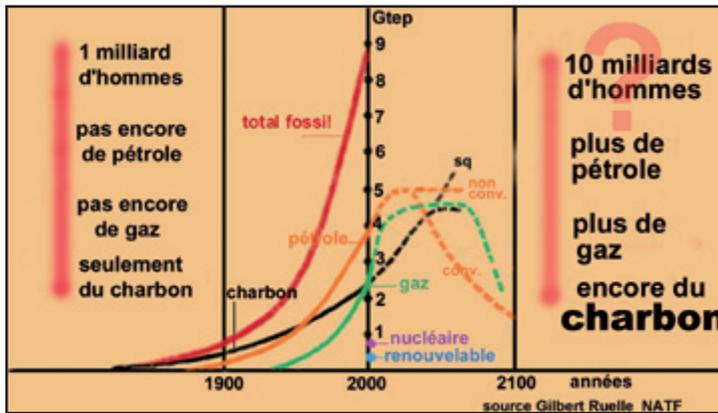
À la suite du charbon qui a permis le lancement de l'ère industrielle, au début du 19^e siècle, le pétrole a suivi vers la fin du siècle et permis le développement du transport automobile, puis le gaz naturel a amorcé son propre développement vers le milieu du 20^e siècle, apportant sa commodité d'utilisation et son abondance.

La consommation annuelle de chacune de ces trois sources fossiles d'énergie primaire continue à croître, la croissance la plus rapide étant celle du gaz.

a) Comment extrapoler ces courbes de consommation d'énergies fossiles de réserves finies ?

Depuis environ un demi-siècle, on annonce la raréfaction des combustibles fossiles, mais les progrès de la prospection et de l'exploitation ont constamment reculé cette prévision. Pourtant, aujourd'hui, on entrevoit plus clairement la raréfaction des réserves d'énergies fossiles. Les prévisions de production présentent naturellement quelques divergences, mais on peut oser le pronostic moyen représenté en pointillé sur la figure 5 pour le siècle en cours.

Figure 5



- Le **pétrole** (conventionnel) connaîtrait un maximum de production d'environ 5 Gtep/an vers 2020/2030, puis amorcerait une descente assez rapide pour tomber en 2100 à moins de 2 Gtep/an. Un accroissement des taux de récupération et l'exploitation de pétroles non conventionnels (huiles lourdes du Venezuela, sables bitumineux du Canada...), ainsi que la production de pétroles synthétiques en partant du charbon ou du gaz pourraient retarder d'une ou deux décennies ces prévisions.
- Le **gaz naturel** pourrait poursuivre son envolée actuelle, passant de 2,5 Gtep/an à environ 4,5 vers 2020, puis peut-être connaître un plateau d'un demi-siècle par une utilisation raisonnée, avant d'amorcer un déclin qui risque d'être plus brutal que celui du pétrole, car si on n'extrait économiquement que 35 à 45 % d'un gisement pétrolier, un gisement gazier est d'emblée vidé à 70 %, ce qui laisse moins de marge pour une surexploitation plus onéreuse.
- Quant au **charbon**, son avenir est moins lié à ses réserves qu'à sa contribution trop importante à l'effet de serre. Si des moyens techniques importants de réduction des émissions de CO₂ sont mis en œuvre par augmentation des rendements et par capture + stockage du CO₂, le charbon pourra continuer à jouer son rôle stabilisateur de réserve-arrière des énergies fossiles sur la durée du 21^e siècle, sinon la priorité donnée à la lutte contre l'effet de serre limitera sa consommation.

En résumé, dès 2020-2030, la production totale de combustibles fossiles pourrait avoisiner 12 Gtep/an, rejetant 10 GtC (contre environ 8 en 2007). Au-delà, la production de pétrole commencerait à baisser.

b) Face à cette offre limitée et polluante des énergies fossiles, doit-on craindre un « gap » énergétique entre demande et offre ?

Pour le premier horizon de temps défini en introduction (2020#2030), on « passe » encore avec les énergies fossiles : 5 Gtep de pétrole, 3 à 4 de charbon, 4 à 5 de gaz et 1 à 2 de nucléaire et de renouvelables, au prix, il est vrai, d'une forte augmentation des émissions de GES, en totale contradiction avec les engagements de Kyoto pourtant bien modestes. C'est pendant la deuxième période que les difficultés de bouclage devraient apparaître.

Nous avons vu à la section 1.2.4 de ce Rapport que les prévisions de consommation en 2050 se situent entre 15 et 20 Gtep/an, pour environ 10 Gtep en 2005 (environ 11 si on inclut la biomasse non-commercialisée). Les énergies fossiles, dont seul le pétrole sera déjà en déclin vers 2050, pourraient probablement en fournir encore environ 12, mais la contrainte carbone qui renchérra leur coût limitera probablement leur contribution à une valeur plus faible.

On peut donc penser qu'il risque d'apparaître vers le milieu du siècle un besoin d'énergie non-fossile de 3 à 6 Gtep/an, voire plus. Les autres énergies (renouvelables et nucléaire) seront-elles en mesure de combler ce gap ? Elles ne « pèsent » aujourd'hui qu'environ 1 Gtep/an (figure 5).

Face à ce défi, nous interrogerons tour à tour les différents types d'énergie en commençant par les énergies fossiles que nous sommes condamnés à utiliser, et examinerons les divers critères qui pourront déterminer leur avenir compte tenu de l'apport possible de nouvelles technologies.

✓ Pour plus de détails sur les énergies fossiles, voir Annexe 2.

On peut résumer ici les conclusions de l'étude présentée en Annexe 2 :

2.2 Le Charbon

Il n'y a pas lieu de penser que le charbon disparaîtra prochainement du paysage énergétique. La recherche pour un charbon « propre » dans les pays qui en disposent et dont le développement ou la suprématie en dépend, comme les Etats-Unis, la Chine et l'Inde, aboutira par nécessité. Si cette séquestration du CO₂ réussit, il paraît probable que la filière charbon pourra réduire sensiblement (d'un facteur 3 à 4) ses émissions de GES, et continuer à être un facteur fondamental de stabilisation du marché mondial des combustibles fossiles, constituant un recours lorsque la raréfaction des ressources ou des contraintes géopolitiques fortes accroîtront sensiblement le prix des hydrocarbures.

2.3 Le Pétrole

La raréfaction des ressources et une exploitation plus coûteuse augmenteront inévitablement le coût du pétrole sur le long terme. Compte tenu de la localisation des ressources dans un nombre réduit de pays de stabilité politique précaire, des tensions majeures sont probables sur le marché du pétrole qui conditionne les transports. Un recours aux pétroles non-conventionnels ou synthétiques plus coûteux et consommant beaucoup d'énergie sera nécessaire à partir d'un certain niveau du cours mondial du pétrole conventionnel. Nous ne disposons que de quelques décennies pour développer d'autres carburants et les motorisations associées, ce qui est un délai très court.

2.4 Le gaz naturel

La croissance très rapide du gaz-énergie a donné un sentiment d'euphorie qui a pu retarder des décisions radicales sur l'évolution du mix énergétique vers des sources plus propres, présentant moins de risques, et disponibles avec une sécurité d'approvisionnement plus grande.

Ce sentiment d'euphorie est en régression, le prix du gaz ayant récemment augmenté et ses contraintes géopolitiques s'étant accrues.

Le gaz naturel est la ressource la plus apte à favoriser un développement plus respectueux de l'environnement dans les mégapoles des pays pauvres, grâce à la souplesse et à la facilité de son emploi. Les principes d'équité, voire d'éthique, devraient donc guider les pays riches vers un usage modéré du gaz naturel, afin que les pays émergents puissent bénéficier de cette source commode à un prix acceptable pour permettre leur développement.

2.5 Perspectives d'actions physiques possibles contre le CO₂

La capture/stockage du CO₂ (CSC) est à prendre au sérieux, son développement viendra de pays qui y ont un intérêt direct pour continuer à exploiter leurs ressources en charbon. L'Europe du Nord s'y intéresse, en raison des possibilités de stockage en aquifère salin sous la Mer du Nord. Son économie est loin d'être assurée et ses risques exigent une analyse approfondie.

Mais on ne pourra jamais capter les émissions trop diluées du CO₂ de la filière transports, qu'on ne pourra éliminer qu'en amont par une révolution des carburants qu'il faut préparer.

Le principe de précaution proportionnée invite à un effort de développement visant à séparer et stocker le CO₂ dans ses émissions concentrées (centrales thermiques, sidérurgie...). Les coûts associés à ces technologies (ramenés à la tonne de CO₂ économisée ou au kWh sans CO₂ produit) sont, néanmoins, encore trop élevés pour qu'on puisse penser que la CSC se développera de façon significative au cours de la première période (avant 2020#2030). En outre, capture et séquestration ne seront jamais efficaces à 100 %¹. Il y a donc lieu d'approfondir les autres solutions à plus court terme, dont la première est d'économiser cette énergie qui nous oblige à un recours aux ressources fossiles limitées et polluantes.

1. Le CO₂ émis au cours du transport du charbon ou du gaz ne sera pas capturé, l'efficacité de la capture pourrait ne pas dépasser 90 %, et la consommation d'énergie du procédé de capture augmente la production de CO₂. Au total, l'efficacité devrait se situer entre 70 et 75 %.

3. Les économies d'énergie

Toute énergie non consommée, qui n'entraîne ni épuisement des ressources fossiles, ni émission de CO₂, est maintenant appelée **Négawatt**, ou de façon plus appropriée **Négatep**¹. Les économies d'énergie apparaissent comme le moyen le plus simple et le plus économique pour participer, dans la limite de leurs moyens, à la lutte contre l'effet de serre. Elles ont toujours accompagné les progrès technologiques : l'énergie nécessaire pour produire une tonne d'acier avait déjà été divisée par 5 de 1880 à 1925 ; le chauffage par m² d'habitat neuf a été divisé par 4 dans les derniers 30 ans, mais la surface a doublé et la température « de confort » a augmenté de 2 à 3 degrés.

À la suite des crises pétrolières des années 1970, de gros efforts avaient été accomplis pour améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels, améliorer l'isolation thermique dans l'habitat et faire la chasse au gaspillage. Ces efforts ont permis de réduire de près de 1 % par an l'intensité énergétique, mais force est de constater que ces efforts se sont un peu relâchés depuis le contre choc pétrolier des années 1985 - 1990.

De gros progrès ont également été accomplis dans le rendement des motorisations automobiles, grâce notamment aux régulations électroniques, mais leurs effets ont été réduits à néant par des dépenses d'énergie pour améliorer la sécurité, le confort (climatisation), augmenter la puissance, et surtout par le nombre de véhicules en circulation.

Question : y a-t-il encore dans la maîtrise de l'énergie une source suffisante de Négateps pour freiner substantiellement l'envol prévisible de la consommation ?

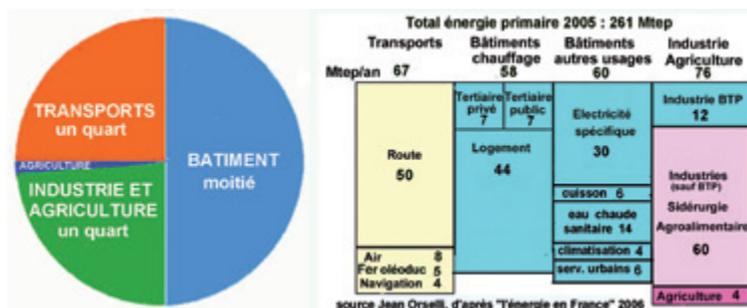
Cette question se pose en France, où il est prévu que cet effort de maîtrise soit considérablement intensifié. Elle se pose surtout dans les pays européens comme l'Allemagne, le Royaume Uni, les pays nordiques, etc., qui sont déjà plus avancés que la France dans cette voie.

Pour répondre à cette question, commençons par examiner la consommation par secteurs d'activité (figure 6).

1. La **tep** (tonne d'équivalent pétrole) étant une unité d'énergie et le **watt** une unité de puissance.

Consommation énergétique par secteurs d'activité (France 2005)

Figure 6 (source J. Orselli)



Les deux secteurs les plus consommateurs d'énergie sont les bâtiments et les transports. Ce sont aussi ceux dont la croissance de consommation est la plus rapide, alors que l'industrie a déjà fait beaucoup d'efforts², sa consommation ayant baissé de 20 % en 30 ans.

3.1 Les économies d'énergie dans l'habitat

Le secteur du bâtiment est donc un domaine majeur des économies d'énergie puisqu'il consomme la moitié de l'énergie en France, dont 2/3 pour les ménages et 1/3 pour le tertiaire.

La partie droite de la figure 6 détaille cette consommation d'énergie en séparant notamment le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la cuisson, l'électricité spécifique. On y voit que le chauffage des locaux représente 45 % de la dépense énergétique du secteur bâtiment et même 56 % en y incluant l'eau chaude sanitaire (qui atteint déjà le quart de la consommation des transports et est en rapide croissance).

Des progrès considérables sont réalisés dans les performances énergétiques des bâtiments neufs grâce à une réglementation contraignante. Mais le faible taux de renouvellement du parc limite l'impact global de cette réglementation. On doit cependant constater que beaucoup de mesures d'économies applicables à l'habitat ancien sont encore possibles, moins bien appliquées en France que chez nos voisins d'Europe : vitrages à isolation thermique renforcée, chaudières modernes sans veilleuse, à régulation électronique, éclairage par lampes basse consommation... Pourtant beaucoup de ces actions ont un temps de retour très court de 1 à 5 ans et sont rentables sans introduire de taxe CO₂.

2. Parfois en délocalisant sa production, ce qui ne réduit pas forcément les rejets de CO₂.

Des actions de substitution des sources d'énergie fossiles génératrices de CO₂ par des sources non génératrices sont également moins développées en France que chez nos voisins d'Europe : chauffage au bois, utilisation du solaire thermique et de la géothermie. Les conséquences sur le confort et la santé publique de quelques canicules peuvent induire un développement de la climatisation, faisant appel à des technologies non optimisées et coûteuses en énergie. Il serait souhaitable que cette tendance, probablement irrésistible, soit encadrée par une réglementation.

Enfin, si l'on considère les pays émergents et ceux en développement, la maîtrise des technologies de l'énergie dans l'habitat est un enjeu important avec la croissance des grandes villes, qui demanderont la climatisation dans la zone intertropicale et le chauffage dans les zones froides³ Le transfert de technologies vers ces pays devrait permettre de réduire la croissance de leur consommation.

3.2 Les économies d'énergie dans les transports

Les transports, qui représentent 1/4 de la consommation d'énergie, utilisent les 2/3 du pétrole et émettent plus de 30 % du CO₂ dans les pays développés. Les transports routiers en constituent de loin la part principale (80 %), mais les transports aériens (12 %) sont en croissance encore plus rapide que les transports routiers.

Malgré des progrès réguliers sur le rendement des motorisations, les économies globales sont freinées par l'accroissement rapide du parc de véhicules, et aussi par des facteurs socio-économiques :

- le goût des acheteurs qui privilégient des critères induisant une plus forte consommation : climatisation, style 4X4, assise haute, confort acoustique apporté par le poids... ;
- l'évolution de la société : habitats éloignés des centres villes, familles éclatées, loisirs accrus par la législation sociale, vacances fragmentées... contribuant à des déplacements plus nombreux et plus longs ;
- le trafic camion qui croît toujours au détriment du rail, par la gestion à flux tendu qui favorise le camion.
- ...et même la réglementation sécuritaire (deux rétroviseurs latéraux consomment autant qu'un accroissement de poids de 50 kg).

L'arsenal technique est pourtant là : Le rendement des chaînes de traction s'améliore constamment, surtout en véhicule diesel qui occupe 55 à 60 % du marché français (rampe commune, très haute pression), mais aussi en véhicule essence (actionneurs, compression variable, combustion homogène). La consommation aux 100 km a baissé de 20 % en 20 ans. La cible d'émission CO₂

3. Sur les 2 milliards d'habitants ne disposant pas d'énergie commerciale, 600 millions doivent se chauffer l'hiver.

de 140 g CO₂/km en 2008 sera probablement atteinte, puis 120 g en 2012 (à comparer à 190 g en 1999), mais ces progrès, pour importants qu'ils soient, ne pourront pas réduire la consommation globale d'énergie par les transports dans les 10 ans à venir, car aux facteurs socio-économiques déjà cités s'ajoute l'effet retard, dû à la lenteur de l'impact d'une nouvelle technologie sur le parc existant.

Il y a donc peu d'espoir à court terme de réduire les émissions de CO₂ dues aux transports, qui actuellement augmentent au contraire de 1,7 % par an.

✓ Pour plus de détails sur les économies d'énergie, voir Annexe 3.

3.3 La maîtrise de l'énergie peut-elle « produire » suffisamment de « Négateps » pour résoudre les problèmes énergétiques ?

Il y a une source non négligeable d'économie dans le chauffage, notamment en France, Mais le chauffage reste toutefois un problème des pays du Nord. S'il représente environ 1/3 de l'énergie consommée dans ces pays, il n'en représente que 1/8 au niveau mondial, donc encore moins dans les PVD. On peut donc craindre que les PVD, qui seront la source principale de croissance de la population mondiale et de la croissance de la consommation d'énergie, ne constituent qu'une faible ressource de ces « Négateps chauffage ». Il faut, toutefois, nuancer ce propos : la consommation pour l'habitat des pays pauvres et émergents (cuisson des aliments, chauffage) fait appel à de l'énergie non-commerciale qui échappe aux statistiques. La pauvreté et la vie rurale entraînent le manque de confort et limitent les consommations. La croissance économique et le développement urbain peuvent entraîner des fortes croissances des consommations domestiques. Il y a donc peu à attendre d'économies sur les consommations actuelles mais il y a au contraire un risque de croissance incontrôlable de ces consommations dans l'avenir.

Il y a peu d'espoir que les transports routiers puissent participer à court terme aux économies d'énergie. À plus long terme (2030 à 2050), la nature du carburant dominant qui commencera à remplacer le pétrole conditionnera les choix de motorisation et cette nature du carburant dépendra fortement du choix du bouquet énergétique (gaz naturel ? hydrogène ? ou hydrogène recarboné liquide ?, d'origine nucléaire ? ou hydraulique ?, ou solaire ?, ou ?...). Il est, en outre, peu probable que l'efficacité énergétique globale soit meilleure qu'avec le pétrole.

L'effet spontané des progrès technologiques est limité par la liberté du public d'en faire usage ou non. Les meilleures technologies permettraient probablement - si elles étaient toutes utilisées - un gain d'environ la moitié de la consommation actuelle dans 20 à 40 ans, consommation qui aura entre temps fortement augmenté, ce qui sera insuffisant pour espérer stabiliser les émissions de GES si on ne modifie pas le bouquet énergétique.

Dans le court terme (2020#2030) il est peu probable que l'évolution des mentalités vers une société écologiquement responsable puisse se faire sans la pression de taxations pénalisantes ou d'incitations fiscales fortes. Sans ces mutations, la demande sera toujours plus forte et effacera tous les progrès obtenus par les évolutions technologiques pendant cette période.

Dans une deuxième période, après 2030/2050, l'évolution des modes de vie et la généralisation des technologies « Négateps » dans tous les domaines pourraient déboucher sur une limitation des dépenses énergétiques et, grâce à des technologies adaptées, à un abaissement des émissions de CO₂. Au-delà, cette limitation ne risque-t-elle pas d'être asymptotique, les économies réalisées au cours de la première moitié du siècle n'étant pas reproductibles dans la seconde moitié, le capital d'économies raisonnablement possibles étant épuisé ?

Le principe de précaution proportionnée invite donc à développer au maximum les économies et la maîtrise de l'énergie, mais ce même principe de précaution invite aussi à ne pas compter que sur ces économies d'énergie pour lutter contre l'effet de serre. Il sera nécessaire d'y ajouter d'autres actions. Il faut donc évaluer soigneusement les conditions d'une exploitation plus intense des énergies primaires n'émettant pas ou très peu de GES: les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire.

4. Le remplacement du pétrole dans les transports

Pendant les vingt années qui viennent, les évolutions technologiques sur le moteur thermique et sur la transmission ainsi que le développement des chaînes de traction hybrides, thermique et électrique, permettront de limiter l'inflation des émissions CO₂ dues au transport routier. Le développement de l'utilisation partielle de carburants « verts », d'origine agricole, apportera une contribution limitée à ces efforts.

Les biocarburants de seconde génération (lignocellulosiques) – dont la ressource est plus importante et sans compétition avec l'alimentaire – pourront, dans les années 2010, réduire davantage la dépendance pétrolière et les émissions de CO₂.

Les véhicules hybrides monoénergie (carburant) apportent dès maintenant une légère amélioration de rendement. Les véhicules hybrides biénergie (pétrole et électricité) pourront apporter, dans les années 2010, une beaucoup plus large économie de pétrole et d'émission de CO₂¹ et contribuer à l'étalement de la consommation quotidienne d'électricité par la recharge nocturne des batteries.

Après 2020/2030, une réduction sensible des émissions CO₂ dues aux transports pourrait commencer à voir le jour, par des changements plus radicaux sur les principes de motorisation (propulsion électrique, pile à combustible) et sur les carburants (hydrogène ou nouveaux carburants de synthèse).

La motorisation électrique pure a des chances très faibles, limitée qu'elle est par l'insuffisance d'autonomie liée aux trop faibles performances de stockage d'énergie des meilleures batteries. Elle risque d'être restreinte à la ville (ce qui, bien sûr, est d'un grand intérêt pour ce qui concerne la pollution locale) et n'aura d'intérêt écologique global que si l'électricité de recharge des batteries est « verte ».

Il est souvent écrit que l'arrivée des piles à combustible (PAC) permettrait un rendement supérieur à celui des moteurs thermiques, mais le développement des PAC est lent, et le rendement global de la filière hydrogène – PAC est actuellement inférieur à celui de la filière gazole dans un diesel moderne.

Les changements radicaux dans les modes de propulsion des véhicules ne seront pas indépendants des changements de filière énergétique pour les usages fixes. Par exemple, il n'est pas concevable que la filière hydrogène se développe sérieusement dans les transports routiers si elle n'est pas déjà un des vecteurs énergétiques majeurs des mondes industriels et domestiques.

1. Dans les pays comme la France disposant d'une électricité à très faible taux d'émission de CO₂.

En définitive, seuls l'électricité, sous une forme ou sous une autre, les biocarburants de seconde génération et les carburants de synthèse, sont en mesure de réduire de façon significative les besoins de pétrole et les émissions de CO₂ dans les transports.

5. Les énergies renouvelables (EnR)

5.1 Leurs caractéristiques

Ce sont des énergies **d'origine solaire** directe (solaire thermique et photovoltaïque), ou indirecte (hydraulique, éolien, biomasse). La géothermie, qui exploite la chaleur interne de la Terre, est aussi classée parmi les énergies renouvelables, bien que d'origine différente. Ces énergies font appel à des ressources réputées renouvelables dans les conditions climatiques actuelles.

Les énergies renouvelables, parce qu'elles n'utilisent pas de combustibles fossiles carbonés, **ne participent pas à la déséquestration du carbone**, certes, issu de la biomasse mais piégé dans des ères géologiques anciennes et transformé en charbon, pétrole, gaz, etc. Quand les énergies renouvelables émettent du carbone (gaz carbonique ou méthane), elles l'ont absorbé peu de temps auparavant dans le cycle de surface du carbone (assimilation chlorophyllienne, fermentation aérobie et anaérobie). C'est pourquoi elles sont aussi appelées **énergies vertes**, puisqu'elles ne participent pas à l'augmentation des gaz à effet de serre. Ces énergies renouvelables portent, de ce fait, l'espoir de ceux qui sont attachés à la **protection de l'environnement** et souhaitent exploiter de **façon durable** les ressources de la planète. Elles en acquièrent une **valeur symbolique** forte, surtout dans les pays riches.

Les énergies renouvelables sont exploitées depuis très longtemps ; leurs principes sont bien connus. Elles ont bénéficié de tous les **progrès technologiques** qui accompagnent l'histoire de l'humanité.

La possibilité de mobiliser des ressources d'énergie renouvelable est très variable à la surface de la Terre puisque le lieu d'extraction est commandé par le **milieu naturel**. Certes, la découverte de l'électricité au début du xx^e siècle a permis d'éloigner les usines des moulins à eau ou à vent et donc le lieu de consommation du lieu de production, mais le transport de l'électricité reste coûteux à longue distance.

Les énergies renouvelables sont des **énergies peu concentrées** si on les compare aux énergies fossiles ou nucléaires. Elles requièrent donc des investissements importants rapportés à la puissance installée. Cela n'empêche pas l'énergie hydroélectrique de fournir l'électricité la moins chère ou l'énergie solaire de fournir l'eau chaude la moins chère lorsque les conditions sont favorables.

Autre conséquence de leur dilution spatiale, elles demandent beaucoup d'espace en comparaison des combustibles fossiles ou nucléaires. Par exemple, sur 1 km², on peut installer de 10 MW à 30 MW en éolien, de 3 à 100 MW en hydraulique, 100 MW en solaire, etc. La biomasse est également grande consommatrice d'espace.

Il se trouve que les **territoires** les plus favorables aux énergies renouvelables sont également ceux qui sont les plus convoités pour d'autres usages. Par exemple, les côtes marines et l'offshore à faible profondeur sont les meilleures implantations des éoliennes, les fonds de vallées sont concernés par les barrages, etc.

Un handicap de certaines énergies renouvelables - et tout particulièrement l'éolien et le solaire - est la variation temporelle de la ressource et sa faible prévisibilité. Tant que ces productions sont minoritaires, le réseau compense les variations rapides grâce aux réserves de puissance qu'elle mobilise en quelques minutes, notamment l'énergie hydroélectrique (y compris les stations de turbinage pompage), ou les turbines à gaz en réserve tournante (qui, elles, produisent des gaz à effet de serre). Ces réserves de puissance ont un coût qui intervient dans l'analyse économique.

Dans le cas de productions décentralisées (panneaux solaires), ce sont en général des batteries qui assurent la continuité de la production, en augmentant considérablement son coût.

5.2 Attitudes diverses, énergies dominantes et dépendantes

Dans les pays riches, la protection des paysages, de la nature, de l'architecture, est souvent en conflit avec le développement de la production d'énergie renouvelable. Cette résistance s'ajoute aux contraintes économiques pour expliquer la modestie du développement récent des énergies renouvelables dans les pays riches. Pourtant l'électricité d'origine renouvelable, garantie par des « **certificats verts** », est vendue à des tarifs supérieurs aux tarifs standards en vertu de leur valeur symbolique positive.

Dans les pays émergents, les conflits d'usage du territoire les plus fréquents sont associés à la création de lacs pour la production d'hydroélectricité et à l'exploitation des forêts et taillis pour le bois de feu. Ces pays recherchent dans les énergies renouvelables des prix bas, une relative simplicité d'utilisation, une part suffisante d'énergie autochtone, garantie d'indépendance énergétique. Ces pays peuvent bénéficier de subventions sous forme d'**échange de permis d'émission de carbone**, proposées par certains pays développés pour favoriser l'investissement dans l'énergie renouvelable dans les pays émergents.

Il est pratique de séparer les sources d'énergie électrique en énergies **dominantes** et énergies **dépendantes**. Les énergies dominantes sont celles qui sont structurantes pour le marché, tant

en termes de prix que de disponibilité et de qualité de l'énergie fournie. Les énergies fossiles, le nucléaire, sont des énergies dominantes. Parmi les renouvelables, l'hydraulique est une énergie dominante. L'éolien, le solaire sont des énergies dépendantes, qui ne peuvent être utilisées qu'associées avec des énergies dominantes et de façon nettement minoritaire (15 % de la puissance installée semble un maximum). La biomasse intervient sous forme de biocarburants en complément ou en additif des carburants fossiles qui donnent la référence économique et sous forme de biogaz de façon très secondaire dans la production d'électricité.

Les énergies renouvelables sont une réalité industrielle. Des politiques de soutien sont mises en œuvre dans la plupart des pays de l'OCDE et la directive européenne sur l'électricité renouvelable impose à la France de s'y associer.

✓ Pour plus de détails sur les énergies renouvelables, voir Annexe 4.

5.3 Tentative de pronostic sur les EnR

On peut résumer les conclusions de l'étude en Annexe 4 en proposant de **jouer toutes les cartes des EnR. Leur « ordre de mérite » (coût complet compte tenu de la totalité des externalités) s'établira naturellement et progressivement au vu de la hausse inévitable du prix du pétrole et du gaz sur les prochaines décennies, et de la taxation retenue pour les émissions de carbone.**

On peut tenter quelques pronostics sur le développement de chacune des énergies renouvelables :

a) L'éolien – compte tenu de la progression de sa courbe d'apprentissage et de la hausse attendue des combustibles fossiles – **deviendra probablement compétitif** en termes de coût par kWh produit, hors incitation ou certificats verts¹, **dans les zones de climat favorable** dans les toutes prochaines années. La part maximum que cette énergie pourra techniquement prendre sur les réseaux (15 % environ en énergie), vis-à-vis des énergies dominantes, dépendra, pour une part, de l'amélioration de la prévisibilité de la production, du coût supplémentaire à payer en termes de réserves et de réseau pour compenser les variations de production, et du coût du CO₂ émis par ces moyens de production en réserve.

b) L'hydroélectricité continue sur sa lancée et se développe dans les pays émergents qui disposent de potentiels hydrauliques. Il s'agit d'une énergie dominante qui valorise particulièrement bien l'éolien du fait de sa capacité de stockage et de démarrage rapide. Plus d'un siècle d'expérience permet de bien traiter les problèmes à résoudre et notamment l'accompagnement des populations à déplacer lorsque l'on doit construire de grands réservoirs de régularisation des débits.

1. Avec un certificat vert, les zones climatiquement compétitives s'élargissent beaucoup.

Dans les cas favorables, la **grande hydraulique** reste la source d'électricité la moins chère de façon durable, capable selon les sites de fournir l'énergie de base ou l'énergie de pointe. Il est à noter que le potentiel hydroélectrique de l'Afrique n'est exploité qu'à moins de 10 % de sa capacité.

La **petite hydraulique**, qui consiste à équiper des sites résiduels de petite puissance à basse chute, de coût plus élevé par unité d'énergie, peut être valorisée par la montée du prix de l'énergie et par une taxation du carbone. L'énergie ainsi récupérée dans les pays développés serait de l'ordre de 10 % de celle du grand hydraulique, mais les oppositions des riverains et des pêcheurs ne permettront sans doute pas d'exploiter totalement cette petite réserve.

c) Le solaire

Le **solaire chaleur** dispose d'un fort potentiel pour l'eau chaude sanitaire et, dans certaines limites, le chauffage.

Le **solaire photovoltaïque** a un impact social important et un fort potentiel de croissance malgré son prix élevé. Il a aussi un fort potentiel de progrès technique sur le long terme par la recherche qui lui est consacrée. Une importante niche de ce marché réside dans l'usage de **générateurs solaires photovoltaïques associés aux bâtiments (toits ou façades solaires) couplés au réseau, dans les régions ensoleillées ayant une consommation de pointe en été**. Le programme japonais d'incitation ainsi que ceux des pays d'Europe du Sud visent ce marché. Ces marchés justifient des investissements notables en recherche technologique et apprentissage industriel.

d) La **biomasse**, sous forme de bois de feu et de déchets agricoles, fournit l'énergie pour la cuisson des aliments et le chauffage à plusieurs milliards d'habitants, mais cet usage souvent non raisonné conduit dans certains pays à une destruction de la forêt et une extension des zones désertiques, ainsi qu'à une détérioration de la santé publique, en raison notamment des effets nocifs de certains gaz et de sous-produits libérés par de telles combustions. La modernisation de ces usages s'impose pour économiser les ressources et protéger l'environnement et la santé publique.

Une utilisation rationnelle de la biomasse pour en faire une énergie renouvelable doit éviter la déforestation et peut développer une activité économique rurale.

Dans les pays développés, les nouveaux usages de la biomasse se déclinent essentiellement entre le **biogaz** et les **biocarburants**. La gazéification des déchets valorise leur traitement et présente une réelle justification économique dans ce cadre. Le débat en France sur les biocarburants n'est pas étranger à la réflexion sur l'avenir de la Politique Agricole Commune (UE-PAC) ou à celui du monde agricole, ni à la recherche de la meilleure utilisation de l'eau, etc. Cela n'en fait pas un problème simple.

Si le dynamisme du monde paysan a placé en tête la production agricole (céréales et oléagineux) sur des terres riches, l'utilisation des produits ligno-cellulosiques, tolérant des terrains plus pauvres ouvre peut-être la porte en Europe à des ressources plus importantes avec des rendements de biocarburants supérieurs². Cette dernière option justifie des efforts de recherche importants.

e) La **géothermie** présente de réelles opportunités, mais **marginales et toujours locales**, car elles dépendent de particularités géologiques qu'il faut exploiter. Elle n'est actuellement utilisée que dans les zones volcaniques pour ses applications haute température permettant une conversion en énergie électrique, ainsi que dans certains bassins sédimentaires privilégiés comme le bassin parisien pour des applications basse température de chauffage de bâtiments. Un espoir d'extension de l'usage de la géothermie existe avec l'exploitation de la chaleur contenue dans des roches sèches profondes, par injection d'eau servant de caloporteur, ce qui pourrait conduire à une extension des sites possibles. L'aboutissement des expérimentations en cours permettra d'éclairer cet espoir vers 2020.

Une autre voie qui se développe pour le chauffage individuel est la géothermie peu profonde, puisant la chaleur du sous-sol proche et relevant son niveau enthalpique par une pompe à chaleur.

Les technologies de la géothermie ne sont pas exemptes de difficultés liées notamment à la corrosion des métaux par les sels dissous.

5.4 Des recommandations ?

✓ Afin de déterminer le coût pour la société du soutien économique à apporter aux énergies renouvelables, il y a lieu d'**élaborer les politiques publiques d'incitation** en tenant un compte rigoureux des espoirs de réduction de coût de chacune des énergies renouvelables par la recherche qui lui est appliquée, par l'apprentissage industriel et par l'effet de volume de son développement, ainsi que des estimations les plus probables d'augmentation de prix des énergies fossiles, de l'établissement d'un marché du carbone et de l'apparition possible d'une taxation autoritaire du carbone émis, quelle qu'en soit la forme.

Cette démarche permettrait d'obtenir la meilleure prévision possible des dates d'arrivée à la compétitivité de chacune de ces énergies et d'adapter au mieux l'aide publique. Elle serait utilement complétée par une comparaison avec les aides publiques consacrées à la promotion des économies d'énergie.

2. Les rendements énergétiques, en revanche, sont souvent médiocres ; pour produire de l'éthanol à partir de blé, par exemple, on consomme presque autant d'énergie que l'on en produit sous forme d'éthanol.

- ✓ Estimer à leur juste valeur les impacts économiques et techniques du développement des ressources éoliennes et solaires sur la gestion des réseaux, compte tenu de leur caractère plus imprévisible et de leur dilution spatiale. Adapter en conséquence l'aide publique.
- ✓ Organiser la compétition entre énergies renouvelables, notamment en leur attribuant des missions adaptées à leurs spécificités.
- ✓ Recommander le recours au mécanisme de développement propre issu de la Convention Climat pour la mise en place de systèmes régionaux de production d'énergie dans les PVD, favorisant le développement économique et utilisant en tout ou partie les énergies renouvelables.
- ✓ Des actions de R & D devront se poursuivre pour réduire les coûts, notamment :
 - Pour le solaire photovoltaïque : réduire le coût des capteurs et du stockage de l'électricité, et améliorer le rendement des panneaux et de leur connectique.
 - Pour la biomasse : développer des filières économes en surfaces agricoles, eau et engrais, notamment ligno-cellulosique, et adaptées aux conditions locales.
 - Pour la géothermie : réduire le risque « minier » dans le choix des sites.

Mais l'effort principal devra porter sur l'apprentissage industriel concernant la production des différents équipements et leur maintenance, source de nouveaux métiers, et les pays concernés par l'industrialisation ou l'exploitation de ces technologies devront accepter d'en payer le coût. L'effort devra aussi viser l'amélioration de la prévisibilité de la ressource (météorologie, climatologie, hydrologie) ainsi que l'acceptabilité sociale dans le débat sur le meilleur usage du territoire.

6. L'énergie nucléaire

6.1 Les peurs du nucléaire

L'énergie nucléaire est actuellement la plus économique des énergies primaires, appropriée à une production massive d'énergie, mais elle est en même temps la plus controversée. Contrairement aux énergies renouvelables qui jouissent d'une image a priori positive dans l'esprit du public, l'énergie nucléaire souffre des peurs issues de ses débuts militaires à Hiroshima et Nagasaki, ainsi que de l'accident du nucléaire civil à Tchernobyl, du risque de prolifération des armes qu'elle peut engendrer, de sa complexité, de la très longue durée de vie des déchets qu'elle génère, et du caractère invisible des rayonnements ionisants.

En France, cette énergie joue un rôle fondamental en entrant pour 75 à 80 % dans la production d'électricité nationale. Il est donc important d'éclairer ses différents aspects en toute transparence et d'examiner le devenir possible des filières nucléaires.

✓ Pour plus de détails sur l'énergie nucléaire, voir Annexe 5.

On y voit que l'énergie nucléaire :

- est apte à une production massive d'énergie sans effet de serre, à un coût compétitif et stable, de l'ordre de 3 c€/kWhé ;
- apparaît comme le moyen actuel de lutte contre l'effet de serre le plus puissant, sous réserve qu'elle puisse être utilisée massivement ;
- ne présente pas de réels risques géopolitiques, l'offre d'uranium étant large et répartie ;
- possède, au terme de quelques décennies, un potentiel d'évolution très important vers des filières à performances accrues en sûreté et produisant moins de déchets ;
- dispose d'un élargissement de marché possible au-delà du secteur électrique, dans les domaines de la production de carburants de synthèse par le biais de la production d'hydrogène, du dessalement de l'eau de mer, de la production de chaleur pour faciliter l'extraction du pétrole dans les sables bitumineux, etc.

6.2 Les scénarios du nucléaire

On peut envisager, en simplifiant, trois scénarios pour l'avenir du nucléaire :

- l'arrêt du nucléaire
- une relance modérée
- une relance forte

Quelles seraient les conséquences probables de chacun de ces scénarios en matière d'énergie fournie, de gestion des ressources et des déchets et en termes d'environnement et d'économie ?

Scénario n° 1 : arrêt (hypothèse d'école, de moins en moins envisagée au niveau mondial)

L'arrêt du nucléaire entraînerait un accroissement de la demande sur les combustibles fossiles, surtout sur le gaz naturel, induisant un épuisement accéléré de ceux-ci et une hausse de leur prix et du prix de l'électricité.

Ce scénario ne participe pas à la réduction, même modeste, des rejets de CO₂ et, bien au contraire, les accroît.

Ce scénario détruit l'espoir d'une réduction des quantités de plutonium et des déchets nucléaires existants au moment de l'arrêt¹.

Scénario n° 2 : relance limitée du nucléaire

Ce serait le cas où la relance aurait lieu seulement en Asie et en Europe. Cette relance limitée ne créerait pas de problème majeur sur les ressources d'uranium, car les réacteurs à eau suffiraient. Cela ne contribuerait que modérément à la réduction du CO₂ et la problématique du plutonium resterait sensiblement la même que dans le cas d'arrêt du nucléaire. Cette relance limitée aiderait toutefois l'Europe et le Japon à respecter leurs engagements « Kyoto ».

Scénario n° 3 : relance forte du nucléaire

Ce serait le cas d'une relance aux Etats-Unis, entraînant le reste du monde. Ce scénario :

- entraînerait un choix de systèmes nucléaires exigeant d'optimiser la production d'énergie, la gestion des ressources et celle des déchets (ex. REP, RNR) et ouvrirait de nouveaux débouchés (HTR) ;
- permettrait une limitation du coût de l'électricité ;
- permettrait une forte réduction des rejets de CO₂.

La réflexion sur ces scénarios doit s'exercer dans le cadre d'une analyse élargie à l'ensemble des énergies primaires, en tenant compte des risques et avantages de chacune d'elles. Les éléments de cette réflexion sont abordés dans les chapitres qui suivent.

1. Dans ce scénario le plutonium (sous-produit de la fission de l'uranium présent dans le combustible usé) doit être considéré comme un déchet toxique et radioactif dont il faut se débarrasser.

C'est au contraire un combustible précieux dans le scénario n° 3, où il alimente les réacteurs à neutrons rapides (voir Annexes 5 et 6).

7. Synthèse de la prospective énergétique

Les 4E, équité, éthique, environnement et économie, se traduisent dans le portrait d'une énergie idéale.

7.1 Portrait d'une énergie idéale

- ✓ Une énergie émettant peu ou pas de gaz à effet de serre.
- ✓ Une énergie durable (ou dont les réserves se comptent en millénaires ou à la rigueur en siècles).
- ✓ Une énergie ayant un coût économiquement acceptable, la valeur « acceptable » étant *a priori* différente dans les pays riches et dans les PVD.
- ✓ Une énergie dont l'approvisionnement peut être sécurisé.
- ✓ Une énergie induisant le minimum de risques pour la santé publique et pour l'environnement local et régional.

Comment se rapprocher de ce portrait robot ?

Nous avons vu que l'application en cascade du principe de précaution conduit :

- à attacher la plus haute importance à la lutte contre l'effet de serre anthropique et à en faire le critère fondamental dans les choix présidant à l'évolution du bouquet énergétique mondial. Un objectif affiché, extrêmement ambitieux et probablement peu réaliste, consiste à diviser par quatre les émissions de GES dans les pays développés d'ici 2050 ;
- à développer tous les moyens technologiques pour réduire et aussi pour capter et stocker les émissions de GES issues de l'usage des énergies fossiles, qui resteront majoritaires pendant la première moitié du siècle, mais en ayant conscience que même si des moyens de séquestration acceptables voient le jour, l'épuisement physique et économique des ressources pétrolières va contraindre à développer rapidement d'autres carburants pour les transports, puis l'épuisement probable des réserves de gaz qui suivra quelques décennies plus tard contraindra à ne plus baser le développement énergétique sur le gaz naturel ;
- à ne pas compter que sur les économies et une meilleure maîtrise de l'énergie pour mener cette lutte, tout en développant ces économies au maximum d'une façon acceptable par la Société ;

- à utiliser au mieux toutes les énergies ne rejetant pas de GES :
 - les énergies renouvelables, surtout sous forme thermique mais aussi électrique, en sachant accepter de manière limitée dans le temps un surcoût raisonnable, mais en ayant conscience des limites physiques et écologiques de ces énergies ;
 - l'énergie nucléaire, en travaillant sur son acceptabilité sociétale.

7.2 Impact sur la santé publique des différentes sources d'énergie

La Commission européenne a réalisé une analyse (projet ExternE) de l'impact sur la santé publique (mortalité et maladies) pour les diverses filières énergétiques. Le résultat indique que l'énergie nucléaire est celle qui présente l'impact le plus faible sur la santé publique.

Si on prend comme unité le risque santé publique du charbon qui est le plus élevé, les impacts relatifs des autres énergies primaires sont indiqués dans l'encadré 1 :

Encadré 1

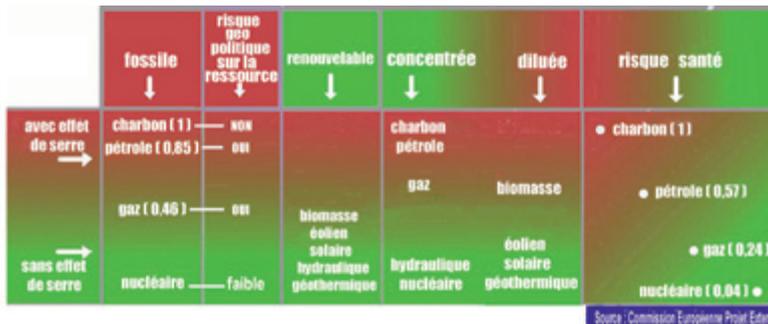
Impact des différentes énergies sur la santé publique			
charbon	1	gaz naturel	0,24
pétrole	0,57	nucléaire	0,04

Ce résultat a été réaffirmé par l'Académie nationale de médecine lors de son colloque du 25 juin 2003 dans une de ses recommandations : « *La filière nucléaire apparaît comme celle ayant le plus faible impact sur la santé par kWh produit quand on la compare à celles utilisant des combustibles fossiles ou même les énergies éolienne, photovoltaïque ou utilisant la biomasse* ».

7.3 Risques et atouts des différentes sources d'énergie

L'intérêt d'une technologie énergétique dépend de l'adéquation de ses caractéristiques avec l'environnement physique et socioculturel dans lesquels on se propose de l'implanter. La figure 7 répertorie les diverses sources d'énergie primaire en fonction des critères qui peuvent leur être appliqués : avec ou sans effet de serre (rouge ou vert), avec ou sans risque géopolitique, plus ou moins coûteuses (concentrées ou diluées), avec leurs degrés respectifs de risque statistique pour la santé publique.

Figure 7



Une approche un peu plus fine du coût complet du kWhé délivré par les principales sources d'énergie figure sur le tableau A ci-après.

Tableau A

ORDRE DE GRANDEUR DU COÛT DU kWh ELECTRIQUE FOURNI PAR DIVERSES SOURCES D'ENERGIE									
	émission de fonctionnement kgC/kWh	émission de construction kg G/kWh	émission totale kgC/kWh	coût de l'émission en c€/kWh à 20€/tC à 100€/tC		coût de production c€/kWh	coût complet c€/kWh à 20€/tC à 100€/tC		
C H A R B O N	cycle classique	0,3	0,03	0,33	0,66	3,3	3,2 à 4	3,9/4,7	6,5/7,3
	cycle supercrit	0,2	0,03	0,23	0,46	2,3		3,7/4,5	5,5/6,3
G A Z	CYCLE COMBINE	0,15	0,01	0,16	0,32	1,6	2,7 à 3,5	3/3,8	4,3/5,1
	NUCLEAIRE	0	0,002	0,002	0,004	0,02	3	3	3
	HYDRAULIQUE	0	0,002	0,002	0,004	0,02	2,2 à 6 (grandes centrales / microcentrales)	2,2 à 6	2,2 à 6
	EOLIEN	0	0,0015 à 0,01	0,0016 à 0,01	0,003 à 0,02	0,015 à 0,1	6 à 8	6 à 8	6,2/8,1
	SOLAIRE PHOTOVOLT	0	0,03 à 0,06	0,03 à 0,06	0,06 à 0,12	0,3 à 0,6	50	~ 50	~ 50

L'analyse qui précède conduit la Commission E & CC aux conclusions suivantes :

- ✓ Pour une production massive, propre et économique d'électricité sans risque géopolitique, l'hydraulique et le nucléaire viennent en tête, le gaz gardant cependant un avantage important en première période.
- Le grand hydraulique est renouvelable, mais les sites étant épuisés dans la plupart des pays développés, le « gisement » est relativement limité. Les pays possédant cette ressource ont intérêt à l'exploiter en priorité.

- Le potentiel de lutte contre l'effet de serre par économie d'énergie est réel et économiquement attractif, au moins pour les pays développés. Il concerne essentiellement l'habitat et les transports. En première période, on ne peut pas s'attendre à un effet marqué, mais il faut néanmoins investir suffisamment dans ce domaine car il peut devenir important en 2^e et 3^e période (pour le transport notamment).
- Les énergies renouvelables, hors hydraulique, ne semblent pas pouvoir prendre une part très importante dans la production d'électricité en première période, ni même en seconde période. Les prix de soutien actuels à l'éolien et au photovoltaïque sont trop élevés et devront être revus à la baisse.
- L'énergie nucléaire de fission s'avère très attractive en première et deuxième périodes, sauf à affecter un « coût social » extrêmement élevé aux risques à court terme (prolifération¹) et long terme (stockage des déchets de haute activité et longue durée). C'est la source la moins chère d'électricité.
- Il s'agit d'une énergie fossile non renouvelable, mais utilisée en filière surgénérateur, sa réserve est de plusieurs milliers d'années.
- Elle limite le plus efficacement le risque du changement climatique, et réunit les meilleures notes en économie, indépendance et santé publique, le tout au prix de revient le plus bas par kWhé.

Mais elle exige pour la construction de chaque centrale des capitaux importants investis sur une longue durée (comme le grand hydraulique, le grand transport du gaz naturel ou les futures grandes centrales à charbon « propre »). Elle exige également un niveau de compétence et une culture de sûreté qui n'existent pas encore dans tous les pays, qui en font un produit non commercialisable universellement, mais qui se développe cependant dans quelques-uns des grands pays émergents, Chine, Inde, Brésil, notamment.

- C'est une énergie de caractère stratégique pour laquelle la réglementation et les décisions ne peuvent se prendre qu'à un niveau national et dans le cadre institutionnel international des réglementations et des accords de non-prolifération sous le contrôle accepté de l'AIEA.

Néanmoins, son acceptabilité par le public est encore difficile, l'Annexe 6 se penche sur les données objectives concernant les risques réels. Une importante campagne d'information auprès du public serait nécessaire pour modifier la perception de ces risques.

1. S'il s'agit du risque de dissémination de radionucléides par bombe « sale », il faut alors craindre toutes les sources radioactives, y compris médicales et industrielles, beaucoup plus facilement accessibles. S'il s'agit du risque de production incontrôlée d'arme nucléaire, on doit retenir que le plutonium extrait des réacteurs à eau légère n'est pas de qualité militaire car il contient trop d'isotopes ²⁴⁰Pu et ²⁴¹Pu. Tous les candidats à la production d'armes nucléaires s'orientent maintenant vers l'uranium très enrichi par centrifugation et non pas vers le combustible extrait des centrales à eau légère.

✓ **Pétrole, gaz naturel et charbon, malgré leurs inconvénients environnementaux et géostratégiques, sont difficilement remplaçables pour certains usages, et vitaux pour les PVD et les grands pays émergents.**

– La production de pétrole, aujourd’hui irremplaçable dans les transports, risque de commencer à baisser bien avant le milieu du siècle, et il apparaît urgent de développer des filières alternatives : pétrole non conventionnel et de synthèse, gaz, biocarburants de seconde génération, électricité ou hydrogène. Pour ces deux derniers, faudra-t-il se tourner vers une production supplémentaire (et massive) d’électricité, notamment si la filière de production d’hydrogène par électrolyse intervient pour une part importante ?

– Le gaz naturel, aujourd’hui abondant, devrait jouer un rôle clé, notamment en première période, dans un développement plus respectueux de l’environnement des pays émergents. Encore faut-il, pour cela, qu’une demande excessive des pays riches ne prive pas ces pays de cette ressource. Ces pays développés ne doivent pas oublier les risques géopolitiques du gaz, ses dangers et son coût de transport de plus en plus élevé. Des mesures sont à étudier pour favoriser son usage en vue du développement des pays pauvres.

– Le charbon, malgré sa pénalisation écologique actuelle, pourra probablement continuer à jouer son rôle traditionnel de réserve et de stabilisateur du marché de l’énergie si les développements en cours vers un « charbon propre » avec séquestration du CO₂ sont couronnés de succès.

✓ **Les énergies renouvelables ont un domaine privilégié de développement pour répondre aux besoins fixes de chaleur**

– La biomasse et le solaire thermique peuvent remplacer les combustibles fossiles pour les besoins de chaleur et de froid des secteurs résidentiel et tertiaire.

– Dans certaines conditions, les énergies renouvelables peuvent fournir de la chaleur à haute température répondant à des besoins industriels.

✓ **Pour une production complémentaire ou décentralisée d’électricité « verte », l’éolien, la biomasse, le solaire et la géothermie ont leur contribution à apporter**

– Dans certaines îles et dans les zones d’habitat dispersé où la rentabilité d’un réseau électrique ne peut être assurée et où le coût de l’énergie est fatalement renchéri par l’éloignement et la faible densité de population, le coût intrinsèquement élevé de ces énergies renouvelables devient relativement moins pénalisant, même si elles seront encore quelque temps en compétition économique avec le pétrole (petits générateurs diesels). Il y a là un créneau leur permettant un développement plus facile que dans les zones à consommation dense, où elles luttent difficilement contre les énergies concentrées.

– Dans les pays développés à forte sensibilité écologique, ces énergies vertes actuellement forte-

ment subventionnées peuvent trouver une niche, en complément des sources d'énergie dominantes, surtout si une taxation des émissions de carbone qui les avantagera est mise en place, et si la tendance amorcée vers une décentralisation de l'énergie se confirme. Contrairement au nucléaire, les investissements dans ces énergies renouvelables, l'éolien, le solaire, la biomasse ou la géothermie ne sont pas individuellement considérables car il s'agit de puissances unitaires beaucoup plus faibles (même s'ils sont plus élevés à puissance comparable) et n'engagent pas une aussi longue durée. Ils sont donc à la portée d'organismes plus restreints, et les décisions sur leur choix pourraient faire l'objet d'une assez large décentralisation.

- Dans certains pays développés où le symbole très positif que portent les énergies renouvelables mérite aux yeux du public de les payer plus cher, on pourrait, dans le cadre de la dérégulation des marchés de l'énergie, favoriser une décentralisation des décisions d'investissement et d'exploitation en faveur de telle ou telle de ces énergies, ce qui permettrait au public d'en faire localement l'expérience, et ainsi de mieux évaluer leur adéquation à ses besoins et d'affiner ses positions sur la prospective des problèmes énergétiques. Ce n'est pas la voie actuellement suivie par l'Europe, qui s'est fixé des objectifs de production d'énergies renouvelables en pourcentage de l'énergie électrique totale et a mis en place des procédures d'incitation pour atteindre ces objectifs. Ces procédures sont financées le plus souvent par une répartition des surcoûts entre les usagers au niveau national. Dans l'Union européenne, les objectifs ont été définis par une directive européenne, laissant aux Etats le choix des procédures.

Les informations apportées ci-dessus constituent les éléments nécessaires pour une réflexion sur la prospective énergétique. Elles permettent d'éviter la polémique absurde entre des positions extrémistes proposant soit du tout nucléaire soit du tout renouvelable.

8. Les attitudes internationales

8.1 Les tendances

Les tendances des quatre classes de pays face aux différents choix énergétiques sont variées :

- ✓ **Les pays pauvres** pensent surtout à leur survie et leur développement, et considèrent que le réchauffement climatique est un problème créé par les pays du Nord qui doivent y faire face seuls (les 2/3 des émissions de GES proviennent des pays de l'OCDE). Si les énergies renouvelables nouvelles (solaire, éolien, géothermie, biomasse) sont susceptibles d'apporter une réponse limitée (par leur coût) aux besoins individuels d'un habitat dispersé (viser 1 kW par personne), leur coût et leur limitation en puissance ne permettent pas de fournir les quantités d'énergie nécessaires pour les mégapoles rapidement croissantes de ces pays, ni même pour créer des activités artisanales significatives lançant un développement décentralisé. Les voies disponibles pour ces pays sont plutôt celles des énergies fossiles, à savoir le charbon malgré la pollution qu'il crée en brûlant, le pétrole, à réserver autant que possible à son usage spécifique du transport, et surtout le gaz naturel lorsque les coûts de transport vers ces pays sont acceptables.
- ✓ **Les grands pays émergents** donnent la priorité à leur développement rapide. Ils disposent en général de ressources de charbon importantes (Chine, Inde), ou hydrauliques (Chine, Turquie, Brésil), à l'exploitation desquelles ils accordent la priorité. Leur développement durable passe après le développement tout court, et l'environnement n'est pas leur première priorité, mais on note toutefois un souci croissant de limiter les dégâts écologiques. L'économie est un critère clé dans leurs choix énergétiques et le gaz naturel pourrait permettre à certains d'entre eux de concilier partiellement économie et écologie.

Dans l'immédiat, pour l'Amérique du Nord – qui dispose de réserves importantes en charbon, mais voit la fin proche de son autosuffisance en gaz naturel et une dépendance croissante de l'extérieur pour le pétrole (Venezuela, Arabie Saoudite) – c'est la sécurité d'approvisionnement et la volonté de conserver une énergie abondante pour maintenir « the American way of life » qui reçoit la priorité. Le credo dans le développement et l'esprit d'entreprise conduit à un fort dynamisme de la recherche pour réduire les pollutions des combustibles fossiles, en évitant tant que cela reste possible le recours à des contraintes réglementaires et des accords internationaux. C'est cette attitude qui explique la politique américaine au Moyen Orient, en Asie centrale, en Alaska..., ou vis-à-vis de la Russie, en vue de s'assurer par tous les moyens le contrôle des approvisionnements en pétrole

et gaz (rapport Cheney¹), avec une réduction progressive du poids de l'Arabie Saoudite et d'autres pays du Moyen Orient. C'est aussi elle qui explique l'attitude négative des Etats-Unis vis à vis du protocole de Kyoto, mais on note toutefois, à travers l'intense effort de recherche et un retour favorable à l'énergie nucléaire, le souci « d'aller vers Kyoto sans les accords formels de Kyoto ».

✓ **Les autres pays développés de l'OCDE** sont beaucoup plus dépendants d'énergies importées que l'Amérique du Nord. Leur sensibilité à l'environnement mondial est aussi plus forte, et la plupart voient plutôt la dérive climatique comme préoccupation première. Ils sont en général favorables aux accords de Kyoto et explorent la voie réglementaire plus activement que les voies de la recherche technologique. Une tendance à une utilisation massive du gaz naturel est l'indice d'une assez faible sensibilité au développement équitable (on n'hésite pas à accaparer à notre profit cette ressource précieuse, au détriment des pays pauvres) ainsi qu'au développement durable (on n'hésite pas à priver de cette ressource les générations futures).

Cette analyse des différentes stratégies énergétiques montre le rôle central que le gaz naturel est appelé à jouer dans le **xxi^e** siècle. Energie dominante, sera-t-elle accaparée par les pays riches comme l'a été le pétrole au **xx^e** siècle ? On touche là aux questions les plus fondamentales d'**éthique** et d'**équité** dans l'utilisation des ressources mondiales d'énergie. Elle montre également que l'Europe est prise dans un réseau de contradictions, qu'il lui faudra dénouer.

✓ **Pour plus de détails sur les négociations internationales, voir Annexe 7.**

8.2 Les contradictions européennes

Les pays européens ont été relativement protégés de la hausse des produits pétroliers, jusqu'alors payés en dollars, par la baisse continue du dollar par rapport à l'Euro. Mais certains grands contrats internationaux commencent à être rédigés en Euros et il est donc possible que cette protection monétaire disparaisse.

Par ailleurs, les pays européens ont choisi de ratifier le Protocole de Kyoto. Il est extrêmement probable qu'ils continueront dans cette voie au-delà de 2010. Ils savent, en effet, que l'effort pour réduire les émissions de gaz à effet de serre n'a de sens que s'il est prolongé sur l'ensemble du **xxi^e** siècle et même au-delà.

1. Le **National Energy Policy Development Group** présidé par le Vice-Président américain, Richard Cheney a produit ce rapport « National Energy Policy » en mai, 2001.

Sur la voie de cette réduction, les coûts et les difficultés iront en croissant, d'une part par la hausse de l'énergie entraînée par celle des produits pétroliers, d'autre part par la hausse inévitable du coût du CO₂ évité. Certains se félicitent aujourd'hui de pouvoir « satisfaire aux obligations de Kyoto », mais ils découvrent que des objectifs beaucoup plus ambitieux leur sont demandés. Sera-t-il possible lorsque le coût moyen de la tonne de CO₂ dépassera durablement 30\$/tonne de fermer les centrales nucléaires ? Des pays comme la Suède ont déjà indiqué que ce ne serait pas possible, et qu'il faudra choisir. Certains rapports de la Commission européenne conduisent à la même conclusion : au-delà des objectifs modestes décidés à Kyoto, les coûts montent de façon abrupte si on persiste à vouloir fermer les centrales nucléaires.

8.3 Une relance de l'énergie nucléaire sera-t-elle nécessaire ?

Si l'augmentation de la consommation d'énergie continue à un rythme voisin du rythme actuel, ou même si elle n'augmente pas mais si le cours du CO₂ augmente comme on peut s'y attendre, et si des moyens massifs de stockage du CO₂ ne sont pas développés rapidement, quelle autre source d'énergie primaire sera en mesure de satisfaire la demande d'énergie et de lutter contre le réchauffement climatique ?

L'énergie nucléaire – dont la part est aujourd'hui du même ordre que celle de l'ensemble des énergies renouvelables – est en mesure de continuer sur sa lancée pendant plusieurs décennies et de contribuer de façon significative au « mix » énergétique en évoluant vers plus de souplesse. Les HTR pourraient notamment ouvrir des débouchés vers les réseaux électriques plus petits et vers des applications nouvelles hors du domaine électrique.

Au-delà de 2050, l'énergie nucléaire principalement basée sur des réacteurs surgénérateurs de Génération IV pourrait se développer de façon durable et permettrait alors de lutter contre l'effet de serre. Elle possède de nombreux atouts : excellente expérience d'exploitation, coûts modérés du kWhé, faible impact sur l'environnement et ressources abondantes. Aux côtés des réacteurs actuels, de nouvelles filières ou de nouveaux systèmes nucléaires devront être développés en particulier la filière des réacteurs à neutrons rapides, pour valoriser l'U²³⁸.

Si besoin, les réacteurs à très haute température pourraient ouvrir des débouchés nouveaux en thermochimie pour produire de l'hydrogène.

Cependant pour se développer, l'énergie nucléaire doit surmonter les obstacles qui l'entravent. Son acceptation par le public est difficile, même s'il en perçoit les avantages. Les centrales nucléaires ne pourraient-elles pas fournir une cible au terrorisme avec des conséquences qui en découleraient aussi désastreuses que l'accident de Tchernobyl ? Le développement du nucléaire ne pourrait-il pas être à l'origine de la prolifération des armes nucléaires dans des pays politiquement

instables ? Les déchets à l'aval du cycle ne constituent-ils pas une menace incompatible avec le principe du développement durable car handicapant l'avenir d'innombrables générations ? Le rejet du nucléaire pour ces raisons est suffisamment puissant pour avoir engagé après l'accident de Tchernobyl certaines nations à renoncer à son usage en Europe ; peu ont pu, comme la Finlande, conduire un débat démocratique gagnant l'opinion à la cause du nucléaire. Il existe pourtant d'excellents arguments à opposer aux craintes exprimées et la dangerosité du nucléaire, notamment pour les effets à long terme de faibles doses comme celles résultant des déchets ; on est loin de reposer sur des bases aussi rationnelles que veulent le dire les organisations antinucléaires.

Au contraire, d'autres développements technologiques également complexes, le nucléaire se prête difficilement à un débat public ouvert et objectif car il reste trop empreint d'émotionnel pour adopter une approche rationnelle. Le citoyen recherche avec difficulté une information objective qu'il doit trier parmi des images souvent déformées ou partielles de la question. Quand il la trouve, encore faut-il qu'il puisse la comprendre, chose à laquelle il est mal préparé de par l'éducation générale, de quelque niveau qu'elle soit, qui occulte le nucléaire 2.

Les questions que le public se pose, rappelées ci-dessus, sont analysées dans l'Annexe 6.

✓ Pour plus de détails, voir Annexe 6 : Analyse des obstacles au nucléaire.

8.4 Les accords internationaux et les négociations en évolution

Les accords déjà acquis, les négociations en évolution, ainsi que les effets possibles des divers types de réglementation envisagés, sont examinés dans l'Annexe 7.

✓ Pour plus de détails, voir Annexe 7 : Négociations internationales.

2. Il est surprenant, par exemple, que 46 % des personnes consultées, selon un sondage récent, ignorent encore que le nucléaire n'émet pas de gaz à effet de serre.

9. Les outils d'une réflexion prospective sur l'énergie

Dans les démocraties, les décisions sont prises au cours d'un processus participatif qui exige qu'une majorité soit convaincue du bien-fondé de ces décisions. Il importe donc que le public concerné soit convenablement informé et instruit pour exercer sa réflexion préparatoire aux décisions démocratiques.

Deux outils sont utiles pour exercer cette réflexion et permettre de choisir les bouquets énergétiques du futur :

- Une conception équilibrée du risque
- Une pensée éthique

9.1 Une conception équilibrée du risque

✓ Pour plus de détails, voir Annexe 8 : une conception équilibrée du risque.

Un outil essentiel de la maîtrise du risque est le principe de précaution, dont un libellé simple est celui exprimé dans la loi 95-101 sur l'environnement :

« L'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement, à un coût économiquement acceptable ».

Une conception équilibrée du risque se résume en deux phrases :

- Il n'est pas raisonnable d'exiger des **certitudes** sur l'existence d'un dommage pour commencer à prendre des mesures préventives.
- Il n'est pas plus raisonnable d'exiger des **certitudes** sur l'absence d'un dommage avant d'autoriser une activité.

Cette conception équilibrée d'un risque géré par le « principe de précaution proportionnée » impose d'agir dans la transparence, ce qui exige de mettre les idées à l'épreuve de la contestation par le débat public, sous la condition de compétence et pertinence suffisantes des opinions émises. La diffusion de l'information et le débat public peuvent contribuer à transformer les risques subis et mal estimés, provoquant le rejet, en risques mieux mesurés et choisis lorsqu'ils ont des contreparties positives suffisantes.

L'acquisition d'une conception équilibrée du risque, ainsi que des ordres de grandeur des coûts, devrait permettre au public de comparer de manière plus objective les différentes sources d'énergie.

Cette objectivité doit aussi être recherchée avec le souci de mettre en perspective historique l'évolution des risques, car dans l'exploitation de toutes les sources d'énergie, les risques se sont progressivement réduits avec le progrès technique et continueront à se réduire par la généralisation rapide de la culture de sûreté.

On doit aussi veiller à l'éthique de l'information, en vérifiant l'exactitude et la pertinence des informations recueillies sur les avantages et les inconvénients et particulièrement sur les risques ou les incidents, éviter de confondre ceux survenus sur des lieux de stockage de déchets nucléaires militaires russes et américains très anciens, n'ayant pas bénéficié des technologies actuelles de sûreté, ou, plus récemment, ceux survenus dans quelques laboratoires de recherche, avec des incidents de centrales nucléaires¹.

Une conception équilibrée du risque et une information respectant l'éthique devraient permettre de considérer les risques des sources d'énergie sur le même plan que les autres risques industriels et d'établir progressivement un consensus confiant suffisamment robuste non seulement pour prendre des décisions raisonnées mais aussi pour résister dans la durée aux inévitables accidents de parcours communs à tous les développements industriels et énergétiques.

9.2 Une pensée éthique

L'éthique est sous-jacente dans les choix énergétiques :

- ✓ par une prise de conscience que l'environnement planétaire (le climat) est un bien commun que personne ne peut s'octroyer le droit de dégrader (le CO₂ émis en Amérique, en Chine ou en Europe a le même effet sur la planète) ;
- ✓ par un objectif d'équité visant un développement solidaire pour tous, clé d'un apaisement de conflits dus aux trop grandes inégalités, et de l'amélioration de la santé publique ;
- ✓ par le souci de transmettre aux générations à venir un monde vivable durablement, sans compromettre la santé publique de la génération actuelle.

Ce sont des questions éthiques « classiques », auxquelles on peut ajouter :

- Un devoir éthique des médias de délivrer des informations de bonne foi et non déformées.
- Le devoir du citoyen de rechercher une information objective afin de ne pas être manipulé par certains lobbies ou médias.

1. Un classement rigoureux et public des incidents dans les centrales nucléaires par risque croissant, montre qu'en France sur une exploitation d'une trentaine d'années, les incidents atteignant un niveau justifiant un début d'inquiétude ont été l'exception.

Mais ces pensées éthiques ne sont-elles pas encore incomplètes ? D'autres considérations plus rarement formulées méritent attention et réflexion :

Pour les projets énergétiques financés par les grands organismes bancaires internationaux, l'usage des fonds résultant de l'exploitation de ces ressources énergétiques ne devrait-il pas être contrôlé plus strictement, afin de prendre le mieux possible en compte les besoins réels du pays et d'éviter des diversions vers d'autres usages sans rapport avec son développement ?

Au risque de paraître iconoclaste, n'y a-t-il pas pour les pays développés un devoir d'utiliser préférentiellement l'énergie nucléaire dont ils ont la maîtrise, afin de pouvoir laisser davantage de gaz naturel plus facile d'emploi aux pays émergents ?

Une des difficultés dans les choix dictés par l'éthique est de ne pas tomber dans l'utopie. Beaucoup de participants sincères et sensibles à l'idée de solidarité humaine militent dans certaines ONG qui expriment parfois en leur nom des vœux pieux totalement irréalistes révélant une analyse insuffisante, comme par exemple « *exiger un moratoire sur les projets d'exploitation des énergies fossiles au bénéfice des énergies renouvelables* » alors qu'il est si clair que les ordres de grandeur de ces sources et leurs potentiels respectifs d'applications ne sont pas les mêmes.

Quelle peut être aussi la portée pratique rapide de propositions qui constituent plutôt un guide pour une démarche s'étalant sur plusieurs générations, telles que : « *la priorité du développement durable doit être de permettre aux pays du Sud l'accès à l'air et à l'eau sains, à l'énergie, à la terre arable, à la santé, à l'éducation, à la démocratie et à la culture* ».

Des espérances ainsi formulées reflètent un idéalisme mobilisant facilement des militants, qui ne dispense pas les citoyens responsables de construire avec un grand souci d'éthique des solutions aux problèmes bien réels.

9.3 Après la réflexion, la décision

Etre muni d'une appréciation du risque étayée par une analyse sérieuse et imprégné de pensée éthique, conduit-il automatiquement à de bonnes décisions quant aux choix énergétiques futurs ?

Probablement, si ces choix étaient faits au sein d'une gouvernance mondiale où tous les pays auraient la même attitude vis à vis des mesures à prendre contre le réchauffement climatique ; mais pas forcément lorsque ces décisions sont prises dans un pays donné à un moment donné, fatalement influencé par ses caractères propres (existence ou non de réserves fossiles, état de développement), par la position des autres pays sur ce point, et aussi par le système économique dominant.

Le classement par ordre de mérite des diverses sources d'énergie sera fortement influencé par le niveau atteint par le prix de la tonne de CO₂ évitée, que ce prix résulte d'un marché mondial du carbone ou de décisions de taxation des émissions de carbone et par l'internalisation de ce coût externe dans le prix de l'énergie produite.

Ce classement sera également influencé par le régime politique de la démocratie qui exige un consensus public et par le régime économique dominant du libéralisme. Les investissements portant sur des fortes puissances indivisibles comme le nucléaire, le grand transport du gaz naturel, ou les grandes centrales « propres » brûlant du charbon, sont très capitalistiques, à longs délais et demandent un long temps de retour de l'investissement, ce qui n'est guère apprécié du marché des capitaux, qui privilégie les investissements à temps de retour rapide et préfère s'investir dans des centrales à cycle combiné au gaz à 500 €/kW constructibles en 2 à 3 ans plutôt que dans une centrale nucléaire à 1 300 €/kW à construire en 5 à 6 ans.

Le coût « interne » (hors taxe CO₂) du kWh final est du même ordre, mais dans le premier cas, le gaz entre pour 70 % dans ce coût interne et il y a émission de CO₂ qui ne restera pas longtemps gratuite. Les règles du marché de l'économie libérale jouent contre l'environnement et contre l'éthique, sauf si elles sont adaptées pour prendre en compte les coûts dits « externes ».

Le courage nécessaire pour s'écarter un peu du strict libéralisme au profit de l'éthique dans les décisions à prendre sur les choix énergétiques sera un révélateur :

- ✓ du degré de prise au sérieux de la dérive climatique et des engagements « Kyoto » par les gouvernements ;
- ✓ de leur degré d'engagement dans l'éthique d'un développement durable et équitable.

On doit souligner que la France – qui se situe déjà parmi les nations écologiquement les plus vertueuses – est, en Europe, le pays ayant les plus faibles émissions grâce à son parc nucléaire existant. Elle s'est dotée en 2005 d'une loi dite « facteur 4 » fixant l'objectif de diviser par 4 les émissions de CO₂ d'ici 2050 par rapport à leur niveau de 1990, objectif qui va donc très au-delà des premiers engagements de Kyoto.

On peut penser que l'énergie, dont le prix monte régulièrement, n'est pourtant pas encore assez chère pour motiver de profonds changements mondiaux dans les « mix » énergétiques et que ceux-ci n'interviendront que lorsqu'une prise de conscience plus aiguë du risque climatique conduira à attribuer un coût suffisamment élevé aux émissions de gaz à effet de serre.

10. Recherches qui influenceront la prospective

L'évolution de la problématique « énergie environnement » dans les décennies à venir sera jalonnée par un certain nombre de clarifications dont nous avons évoqué quelques-unes :

- ✓ la finalisation des études de stockage géologique des déchets nucléaires ;
- ✓ une confirmation des risques majeurs de l'effet de serre ;
- ✓ une meilleure connaissance des possibilités de stockage du CO₂.

Elle sera jalonnée, à plus long terme, par quelques dates-clés, telles que :

Vers 2020 - 2030 :

- ✓ le début de déflation de la production de pétrole ;
- ✓ une meilleure prévisibilité de ce que sera la consommation mondiale d'énergie après 2050 ;
- ✓ la connaissance des voies technologiques susceptibles de déboucher au-delà de 2050.

Vers 2050 :

- ✓ une meilleure prévisibilité de début de déflation du gaz naturel ;
- ✓ la mise en œuvre de nouvelles technologies manquant de visibilité à ce jour.

L'examen de ces différentes dates incite à rester très modeste quant à notre capacité à prévoir l'évolution des développements, même dans le domaine de l'énergie. Il incite, en revanche, à être extrêmement vigilant, et à tout faire pour identifier des « politiques de précaution » permettant d'éviter d'être surpris par des crises plus ou moins graves affectant le secteur énergétique.

L'horizon technologique est probablement celui où l'Académie des technologies peut essayer de porter quelque lumière en scrutant les recherches et développements en cours dans le domaine de l'énergie.

Nous classerons les R & D qui peuvent avoir une incidence majeure sur la réflexion prospective en quatre catégories :

- ✓ L'exploitation des énergies primaires
- ✓ Les nouveaux vecteurs d'énergie (hydrogène, pile à combustible...)
- ✓ Le stockage de l'électricité
- ✓ Les nouvelles sources d'énergie (fusion nucléaire, solaire satellitaire,...).

✓ Pour plus de détails, voir Annexe 9 : Recherches influençant la prospective.

11. Conclusions

Le présent Rapport s'était donné pour but de dresser un panorama des réalités énergétiques d'aujourd'hui et des scénarios de demain. Ce faisant, il a été amené à insister sur quelques questions qui restent non tranchées et à proposer quelques réflexions sur la méthode de décision.

Aller plus loin n'entraîne pas dans les buts de la Commission E & CC de l'Académie des technologies. Ce sera à chaque lecteur de tirer ses conclusions, qui varieront beaucoup selon qu'il réfléchira sur les 20 prochaines années, sur le demi-siècle, ou au-delà. Et qu'il voudra traiter l'évolution énergétique du monde dans son ensemble, des seuls pays pauvres, des pays émergents, ou des pays de l'OCDE. Toutes ces trajectoires seront différentes, même si elles sont liées par quelques « fondamentaux » que partagent tous les pays : le prix des produits pétroliers, l'évolution du climat.

Dans la « Grille d'analyse des problèmes d'énergie » que l'Académie a proposé¹, il est conseillé de structurer la réflexion autour de quatre « Transitions » qui, très probablement, marqueront le monde de l'énergie au cours du 21^e siècle. Le lecteur y reconnaîtra la problématique du présent Rapport. Ce sont :

Les quatre transitions

- T1 : Plafonnement de l'extraction du pétrole, et entrée dans un système de prix de plus en plus élevés.
- T2 : Généralisation du protocole de Kyoto, entraînant une forte variation des prix relatifs des différentes énergies.
- T3 : Plafonnement de l'extraction du gaz, accélérant la montée du prix de cette énergie.
- T4 : Séparation entre les usages fixes et les usages liés aux transports.

Tous les pays seront affectés par ces transitions, mais pas de façon égale et surtout pas à la même période. Le Rapport montre qu'il existe des technologies qui permettent d'aborder ces problèmes. Plus précisément, on doit pouvoir, en combinant développements technologiques et décisions politiques, définir des trajectoires qui gèrent au mieux ces transitions et leurs conséquences.

Pour mieux définir ces trajectoires, il faut réfléchir à partir de groupes de pays formant des ensembles cohérents : l'Amérique du Nord, la Chine, l'Europe forment de tels ensembles. Ce n'est pas le cas de la

1. Avis de l'Académie, remis au ministre délégué chargé de l'Industrie, déc. 2003

France ou du « Sud ». Mais, en tout état de cause, il s'agit d'études lourdes, qui conduiraient à des rapports très différents de celui-ci et pour lesquels la Commission E & CC ne se sentait pas suffisamment armée. Elle espère en revanche que le présent rapport pourra être utile à ceux qui iront plus loin dans leurs réflexions.

Les Annexes 0 (Rappel général), 1 (Dérive climatique) et 2 (Energies fossiles) situent la problématique générale « énergie-environnement ».

Les Annexes 3 (Economies d'énergies), 4 (Energies renouvelables) et 5, 6 (Energie nucléaire) couvrent le domaine des énergies n'émettant pas de gaz à effet de serre.

Les Annexes 7 (Négociations internationales), 8 (Conception équilibrée du risque) et 9 (Recherches pouvant influencer la problématique) contribuent à la synthèse.

ANNEXES

Annexe 0 – Quelques rappels fondamentaux	69
Annexe 1 – La dérive climatique	77
Annexe 2 – Les énergies fossiles	81
Annexe 3 – Les économies d'énergie	97
Annexe 4 – Les énergies renouvelables	107
Annexe 5 – L'énergie nucléaire	129
Annexe 6 – Analyse des obstacles au nucléaire	135
Annexe 7 – Négociations internationales	149
Annexe 8 – Une conception équilibrée du risque	157
Annexe 9 – Recherches influençant la prospective. Vecteurs d'énergie	163

Annexe 0

Quelques rappels fondamentaux

0.1 Rappels sur l'énergie

L'énergie, dans son utilisation finale, prend le plus souvent le sens d'un travail mécanique accompli, c'est son sens étymologique (en grec *erg* : idée de travail, dérivant lui-même de l'indo-européen *werg* qui a donné *work* en anglais et *werk* en allemand). C'est dans ce sens que l'énergie est simple à comprendre et a été utilisée depuis des millénaires par les moulins à eau ou à vent, qui puisaient directement dans les sources naturelles d'énergie mécanique renouvelable de l'eau qui chute et du vent qui souffle. Pour d'autres sources non-mécaniques, comme la chaleur issue d'une combustion, la métamorphose de l'énergie thermique jusqu'au travail mécanique final est plus difficile à saisir et n'a été comprise qu'au dix-neuvième siècle avec l'avènement de la machine à vapeur.

Pendant longtemps, les hommes ont ignoré le concept global d'énergie ; ils utilisaient le feu pour se chauffer, s'éclairer, cuire leurs aliments, fondre les métaux ; ils utilisaient leur propre force physique et celle des animaux domestiqués pour labourer et transporter, l'eau et le vent pour broyer le blé et les olives. Ils ignoraient que la chaleur et le travail étaient deux formes d'un même concept global : l'énergie.

Puis ils ont trouvé comment créer de l'énergie mécanique à partir de la chaleur, mais dans cette transformation, toute l'énergie contenue dans la chaleur ne se retrouve pas dans l'énergie mécanique produite. C'est un point fondamental à bien comprendre, dont l'explication est rappelée ci-après.

Un système physique isolé (n'échangeant rien avec l'extérieur) peut être caractérisé par plusieurs images :

01.1 L'énergie d'un système est la première de ces images, qui se caractérise par la loi fondamentale bien connue de sa conservation (aussi nommée premier principe de la thermodynamique), qui dit : « *Dans un système isolé, l'énergie reste constante dans le temps* ». Cette première loi interdit la création d'énergie à partir de rien (le mouvement perpétuel...).

Si on divise un système isolé en deux parties interagissant, l'énergie gagnée par l'une sera égale à l'énergie perdue par l'autre, mais la somme restera constante. L'énergie totale du système conserve la même valeur avant et après n'importe quel événement survenant dans le système. Sa forme

peut varier, elle peut se présenter sous forme d'énergie mécanique potentielle ou cinétique, de travail, de chaleur, de consommation d'électricité, de matière (n'oublions pas $E = m.c^2$ qui exprime que la matière est une des formes de l'énergie), mais elle reste constante dans le temps.

Dans un système isolé, on retrouve à tout moment la même quantité d'énergie que celle ayant pu y être observée dans le passé. On ne la retrouve pas forcément sous la même forme, de l'énergie électrique a pu se transformer en travail mécanique dans un moteur, ce travail a pu se transformer partiellement ou totalement en chaleur, mais on retrouve la même quantité d'énergie totale¹.

0.1.2 l'entropie d'un système L'image «énergie» s'est révélée insuffisante pour caractériser complètement un système isolé et il a fallu lui adjoindre une seconde image :

l'entropie d'un système, qui est ce qu'on pourrait appeler la qualité de l'énergie. C'est une grandeur physique qui était passée totalement inaperçue jusqu'au ^{XIX}^e siècle, où on a commencé à extraire la force motrice de la chaleur avec les machines à vapeur. Cette seconde image se caractérise par une seconde loi, très différente : contrairement à l'énergie, **l'entropie d'un système isolé réel ne reste pas constante, mais augmente avec le temps.**

Nous n'entrerons pas au cours de ce rappel dans les diverses définitions mathématiques de l'entropie (au sens macroscopique thermodynamique de Clausius $S = \int dQ/T$, et au sens microscopique probabiliste de Boltzmann $S = k \log W$) ; nous retiendrons seulement que l'entropie introduit une hiérarchie entre les différentes formes d'énergie, la chaleur devenant une forme dégradée en comparaison des énergies nobles que sont l'énergie mécanique, l'énergie électrique ou l'énergie chimique et nous essaierons d'expliquer directement pourquoi.

La chaleur est l'expression du mouvement désordonné des molécules, la température absolue en est la mesure de l'énergie cinétique moyenne de ces molécules. Le grave défaut de ce mouvement est justement d'être une agitation désordonnée, sans direction préférentielle, ce qui ne rend son utilisation possible que pour le chauffage, qui n'est que le transfert partiel par contact du mouvement désordonné des molécules d'un système (la flamme), à celles d'un autre système (les molécules de l'eau de la casserole ou de la chaudière).

Ce caractère désordonné introduit une irréversibilité : si on laisse tomber une pierre sur le sol, toutes ses particules ont, pendant la chute, une vitesse moyenne ordonnée vers le bas ; en percutant le sol, ces particules perdent leur vitesse moyenne et l'énergie cinétique correspondante, en la communiquant aux particules du sol, qui, par entretchocs successifs, vont s'agiter un peu plus et diluer cette énergie mécanique en énergie thermique désordonnée qui chauffe légèrement le sol au point d'impact. Au total, l'énergie s'est conservée, mais on est passé d'une énergie mécanique noble à une énergie dégradée. L'énergie noble aurait pu permettre d'en faire un usage mécanique, par exemple en faisant tomber la pierre à travers un mécanisme qu'elle entraînerait, comme l'eau

1. Ce qui fait qu'en toute rigueur on ne devrait pas parler de « consommation » d'énergie, mais de « transformation ».

qui tombe dans une turbine entraînant un alternateur qui génère de l'électricité, alors que l'énergie thermique est une énergie dégradée, parce qu'elle correspond à des vitesses désordonnées des particules, dont on ne peut plus tirer un travail. Dans cette chute, l'entropie a augmenté et amené le *désordre*.

Inversement, si on chauffe le sol à l'endroit où est tombée la pierre, on ne pourra jamais la faire jaillir du sol parce qu'on ne communique par chauffage qu'un mouvement désordonné qui ne peut pas se transformer en mouvement ordonné (plus exactement, qui n'en a qu'une infime probabilité). On perçoit ici la fausse équivalence entre travail et chaleur : le travail se dégrade en chaleur dans sa totalité avec une aisance remarquable, alors qu'on ne peut pas transformer la chaleur en travail à partir d'une seule source de chaleur. On aperçoit là une irréversibilité.

À cause de ce caractère désordonné des vitesses des molécules, il est impossible de tirer un travail mécanique d'une seule source de chaleur, il en faut deux mises en liaison. Dans ce cas, les molécules plus rapides (d'énergie cinétique plus élevée) de la source chaude vont percuter les molécules plus lentes de la source froide, et les accélérer mécaniquement ; il y a un mouvement général moyen de molécules dirigé depuis la source chaude vers la source froide dont on peut extraire l'énergie cinétique moyenne sous forme mécanique, comme un vent de molécules.

Cette **deuxième loi de la thermodynamique** (dite également principe de Carnot) énonce que le travail peut se transformer totalement en chaleur avec conservation de l'énergie, mais en sens inverse interdit à la chaleur de se transformer totalement en travail. Cette irréversibilité est responsable du faible rendement de tous les moteurs thermiques, que ce soient ceux de nos voitures ou les grandes turbines des centrales thermiques.

En mettant en relation une source chaude à température T_c et une source froide à température T_f , on superpose à l'agitation thermique de chacune des sources un déplacement d'ensemble de matière de la source chaude vers la source froide, d'où l'on peut tirer une force motrice. Le **rendement** que l'on peut tirer de cette transformation d'énergie thermique en énergie mécanique est au maximum de $1 - T_f/T_c$, formule qui montre clairement qu'avec une seule source ($T_f = T_c$), ce rendement est nul et que même avec deux sources et les températures couramment utilisables, le rendement reste toujours très éloigné de 1, entre 0,2 et 0,4 pour la plupart des moteurs thermiques.

On ne doit donc pas s'étonner de voir citer pour les centrales thermiques ou nucléaires, qui utilisent toutes la chaleur comme forme première de l'énergie, des rendements de 30 à 45% pour l'énergie mécanique, puis électrique extraite de l'énergie thermique, atteignant 55% en cycle combiné ; ce n'est que si on récupère une partie de la chaleur perdue pour l'utiliser en chauffage direct (cogénération de chaleur et d'électricité) que l'on peut atteindre un rendement énergétique global (électricité et chaleur confondues) de l'ordre de 85%.

En face de ces faibles rendements des centrales thermiques, les centrales hydrauliques permettent d'extraire une énergie électrique de l'énergie mécanique de l'eau avec un rendement de 70 à 90% selon les puissances.

On voit que la notion d'énergie ne suffisait pas et que la notion d'entropie introduit quelque chose de nouveau, qui est un repérage du niveau de qualité de cette énergie ; ***l'augmentation de l'entropie globale qui accompagne toute évolution n'est rien d'autre que la diminution de l'énergie utilisable.***

0.1.3 Commentaire supplémentaire pour les philosophes

*Si on reprend l'examen d'un système isolé sous l'angle de l'entropie, comme on l'a fait pour l'énergie et que l'on divise ce système en deux parties interagissant, l'entropie gagnée par l'une sera toujours supérieure à l'entropie perdue par l'autre, et l'entropie globale, somme des deux, ne pourra qu'augmenter. Cela signifie que, dans un système isolé, on ne pourra jamais retrouver dans le futur l'état d'entropie qu'il a connu dans le passé, car entre temps elle n'a pu qu'augmenter, aboutissant à un état de plus grand **désordre**, de plus grande **uniformité**, et de plus grande **probabilité**.*

L'entropie est, en quelque sorte, une mesure du degré d'irréversibilité de l'évolution des phénomènes physiques. Contrairement à ce qui se passait pour l'énergie invariante avec le temps, le sens du temps s'affiche clairement dans le concept d'entropie puisque celle-ci varie dans un sens unique qui est celui du temps.

La réversibilité ne peut exister que pour un système simple et sans frottement (quelques boules d'un billard idéal, ou quelques atomes, pour lesquels une séquence inverse de celle observée est plausible), mais dès que le nombre de composants du système s'élève, la probabilité d'apparition d'une séquence inverse dans le temps diminue fortement. L'irréversibilité est donc aussi une mesure de l'improbabilité, l'improbabilité étant elle-même une conséquence de l'intervention d'un très grand nombre de composants, donc de la complexité. L'entropie existe parce que le monde est constitué de particules en nombre incommensurable interagissant entre elles selon des lois diverses. Pour les systèmes très simples évoqués, la physique aurait pu n'utiliser que le concept d'énergie et ignorer celui d'entropie.

Si on se hausse d'un degré dans la réflexion, on peut en conclure que c'est l'existence même de ces phénomènes irréversibles tels qu'observés à notre échelle macroscopique, qui induit dans nos esprits la notion de temps et qui permet de fixer le sens d'écoulement objectif du temps, donc sa flèche.

La nature nous offre ce phénomène de l'irréversibilité, la flèche du temps en est la conséquence : l'existence de la matière et de sa structure atomique, formée d'un nombre incroyablement élevé

de particules, entraîne l'irréversibilité des phénomènes et donc l'existence d'une flèche du temps, imagée par l'entropie (le terme entropie porte en lui sa signification profonde, puisque son origine grecque signifie « cause d'évolution »). Cette orientation du temps n'est donc pas une propriété de l'espace-temps seul, c'est une propriété de la matière-espace-temps.

0.2 Rappel sur l'effet de serre (résumé)

(D'après Hervé Le Treut (Université de tous les savoirs (UTLS), 23 juillet 2000)

Un certain nombre de gaz amplifient un effet naturel tout à fait remarquable, que l'on désigne sous le nom d'effet de serre. Ce processus fait jouer un rôle considérable aux gaz minoritaires de l'atmosphère (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, méthane, ozone). En empêchant le rayonnement infrarouge terrestre de quitter librement la planète, ils maintiennent suffisamment de chaleur près du sol pour rendre la planète habitable (elle aurait autrement à sa surface une température moyenne de -18 degrés Celsius).

À un effet de serre naturel, vient s'ajouter un effet de serre additionnel, lié aux activités humaines, dont on peut calculer l'amplitude de manière assez précise. L'effet de l'augmentation déjà acquise des gaz à effet de serre est de 2.4 Wm^{-2} . Un doublement du CO_2 nous conduirait (ou plus exactement nous conduira, puisque cette échéance est presque inéluctable) à 4 Wm^{-2} . Ces chiffres peuvent paraître faibles comparés au fonctionnement général de la machine climatique : le rayonnement solaire moyen absorbé au sommet de l'atmosphère, qui met en route le système climatique, est de 240 Wm^{-2} et la perturbation anthropique est donc une perturbation au centième de la machine thermique « Planète Terre ». Mais si l'on songe que la température de notre planète est de 300 degrés Kelvin, cette modification est suffisante pour modifier la température en surface de quelques degrés, ce qui est considérable, puisque seulement 5 à 6 degrés nous séparent d'un âge glaciaire. Il s'agit donc d'une perturbation forte du climat généralement très stable que nous connaissons depuis 8 à $10\,000$ ans.

0.3 Rappel sur la radioactivité (résumé)

La radioactivité est un phénomène naturel. Comme pour l'effet de serre, elle a contribué à faciliter la vie sur Terre, car en son absence, la température serait une dizaine de degrés plus basse. Cette radioactivité naturelle a une histoire, qui est l'histoire de la matière elle-même.

Dans la première seconde de l'Univers, l'énergie gigantesque injectée au Big-Bang s'est condensée en particules les plus élémentaires de matière (quarks et antiquarks, puis leptons et antileptons), qui ont commencé à s'assembler vers 3 minutes d'âge, en protons et neutrons, puis en noyaux légers par fusion nucléaire entre 3 et 30 minutes et enfin en atomes d'hydrogène et d'hélium

assortis de leurs électrons vers 500 000 à 1 million d'années lorsque la température a chuté vers 3 000 degrés par l'expansion.

Après un milliard d'années, l'Univers a commencé à perdre son homogénéité, des amas d'hydrogène se sont formés par attraction gravitationnelle et se sont échauffés par cette compression gravitationnelle, jusqu'à des températures supérieures à 10 millions de degrés permettant la fusion nucléaire de l'hydrogène en hélium, qui libère de l'énergie, allumant des étoiles qui brûlent l'hydrogène en hélium, en maintenant leur température par l'énergie issue de cette fusion nucléaire.

Les plus grosses d'entre ces étoiles, soumises à une plus forte compression gravitationnelle, atteignent des températures plus élevées, autorisant d'autres types de réactions nucléaires qui épuisent l'hydrogène en quelques millions d'années seulement, conduisant à un effondrement gravitationnel qui porte leur température vers 200 millions de degrés, ce qui permet la fusion des noyaux d'hélium en noyaux de carbone, puis elles gonflent en géantes rouges et, quand tout l'hélium est consommé, elles se contractent en s'échauffant vers 500 millions de degrés, ce qui permet la formation des atomes plus lourds : néon, oxygène, sodium jusqu'au fer, car toutes les réactions de fusion nucléaire des corps les plus légers (de l'hydrogène au fer) dégagent de l'énergie.

Au-delà du fer, le processus de fusion devient consommateur d'énergie, donc faute de carburant, la pression radiative ne peut plus équilibrer la compression gravitationnelle et ces grosses étoiles s'effondrent alors sur elles-mêmes, l'extrême compression entre les particules permettant aux électrons de fusionner avec les protons pour les transformer en neutrons. Au stade final, ces grosses étoiles riches en neutrons explosent en supernovae.

C'est au cours de cette explosion que, sous une pluie de neutrons apportant leur énergie, se forment les éléments plus lourds que le fer, jusqu'aux éléments très lourds comme l'uranium, dont certains isotopes sont instables. Ils se transforment alors spontanément par désintégration nucléaire pour atteindre des états plus stables: ce sont les isotopes radioactifs ou radionucléides. Expulsés dans l'espace, une partie de ces radionucléides a atteint le système solaire. On les retrouve dans les planètes.

L'uranium²³⁵, l'uranium²³⁸ et le thorium²³² sont les noyaux les plus lourds existant encore depuis la dernière explosion de supernova précédant la formation du système solaire. Grâce à leur très longue période de désintégration (de l'ordre du milliard d'années), ils sont présents sur Terre.

Ces corps radioactifs émettent au cours de leurs désintégrations des rayonnements qui sont, soit des ondes électromagnétiques, soit des particules. Il sont dits « ionisants », parce que leur énergie est suffisante pour rompre les liaisons chimiques entre noyaux et électrons, transformant les atomes en ions, pour créer des « radicaux libres » de forte réactivité chimique (par exemple OH).

Trois types de rayonnement ionisant peuvent être émis par désintégration : alpha, beta et gamma :

- ✓ Le rayonnement α est une émission de noyaux d'hélium (2 protons+2 neutrons) ; il est peu pénétrant, quelques centimètres d'air, ou la surface de la peau, l'arrêtent. Il n'est dangereux que par inhalation ou ingestion des radionucléides qui l'émettent, par exemple, dans les poumons par respiration de radon.
- ✓ Le rayonnement β est une émission d'électrons ; il est plus pénétrant que le rayonnement α , avec un parcours dans l'air de quelques mètres, il peut traverser les couches superficielles de la peau.
- ✓ Le rayonnement γ est une émission de photons très énergétiques ; il est très pénétrant, de fortes épaisseurs de béton ou de plomb sont nécessaires pour l'arrêter.

La Terre contenait donc dans sa croûte les isotopes de l'uranium dès sa solidification il y a 4,5 milliards d'années, avec un taux de radioactivité moyen 4 à 5 fois supérieur à celui d'aujourd'hui. Depuis, chacun de ces radionucléides a subi des désintégrations successives selon sa propre période.

Un exemple frappant de radioactivité naturelle est la quinzaine de réacteurs nucléaires naturels découverts dans la mine d'uranium de Oklo, au Gabon, ayant fonctionné il y a environ 2,5 milliards d'années et pendant plusieurs millions d'années. Comme la période de désintégration de l'uranium²³⁵ (le seul fissile) est beaucoup plus courte que celle de l'uranium²³⁸, la concentration en uranium²³⁵ était à l'époque plus élevée qu'actuellement et il n'était pas nécessaire d'enrichir l'uranium, comme on le fait maintenant, pour alimenter les réacteurs modernes. En présence d'eau et sous la pression due à une profondeur de plusieurs kilomètres, des réacteurs naturels se sont alors amorcés spontanément sous terre et ont fonctionné dans des conditions voisines de nos réacteurs actuels, produisant localement les mêmes déchets nucléaires qui font souci actuellement, et dont la nature locale a su limiter la migration, alors qu'ils n'étaient pourtant pas enfermés dans des conteneurs sophistiqués. C'est l'érosion qui a amené les réacteurs en surface.

D'autres sources de radioactivité que cette radioactivité tellurique existent : les rayons cosmiques pénétrant dans la haute atmosphère en sont une, soit par action directe, soit par création de radionucléides en percutant des composants de l'atmosphère (carbone¹⁴, tritium...), les examens et traitement médicaux de médecine nucléaire en sont une autre, artificielle, mais qui a les mêmes effets à dose égale.

En Europe, chaque individu est soumis annuellement à une dose due aux radiations ionisantes naturelles de l'ordre de 2,4 mSv (variable suivant les régions de 1,9 à 3,5, mais pouvant dépasser 100 mSv/an dans certaines autres parties du monde), dont environ 70% est d'origine tellurique (rayonnement direct et inhalation de radon), 15% viennent des rayons cosmiques (doublant d'amplitude tous les 1 500m d'altitude) et 15% sont ingérés avec les aliments contenant des

radionucléides. A cela s'ajoutent les radiations ionisantes artificielles des examens radiographiques et des traitements médicaux (~+30%).

Ces radiations ionisantes ont des effets sur les cellules du vivant, dépendant de la dose reçue et de sa vitesse d'acquisition. La radioactivité est d'autant plus importante que la période est courte. Ainsi l'iode¹²⁹ de période 16 millions d'années, ingéré par l'homme, a un effet 800 millions de fois moins important, à concentration égale, que celui de l'iode¹³¹ (période 8 jours).

Ces effets se manifestent par une altération de l'ADN des cellules, entraînant des ruptures de brins, mais elle est très faible. Ce phénomène est maintenant bien connu car les ruptures de brins d'ADN sont extrêmement fréquentes par l'attaque de divers toxiques, dont le principal est l'oxygène de l'air et ses radicaux libres : la respiration occasionne jusqu'à 10 000 altérations d'ADN par jour dans chaque cellule ; le maintien de la température corporelle à 37°C par le métabolisme crée 20 000 à 40 000 cassures d'ADN par cellule et par jour. Une irradiation de moins de 40 mSv/an génère environ 2 cassures par cellule et par an.

Tant que l'on reste dans le domaine dit des faibles doses (inférieures à 100/200 mSv/an), il n'a jamais été observé d'effet biologique sur l'homme. Cela est probablement dû aux mécanismes spontanés de réparation des brins d'ADN maintenant connus, ainsi qu'aux mécanismes naturels de suicide des cellules trop atteintes (apoptose) qui interdisent la reproduction des cellules anormales. Au-delà de 200 mSv, des cancers de la thyroïde peuvent commencer à apparaître, par exemple, chez l'enfant qui est le plus sensible. Une forte dose de l'ordre de 10 000 mSv reçue en un temps court est rapidement létale.

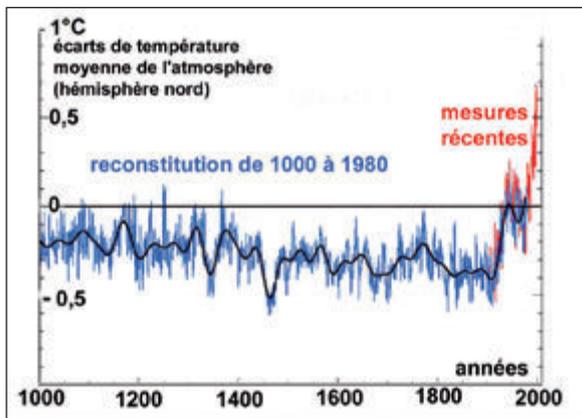
Annexe 1

La dérive climatique

Il n'est pas du ressort de l'Académie des technologies d'apprécier le degré de crédibilité des analyses conduites sur le risque climatique. Pour se faire une opinion, cependant, elle se réfère aux études de l'Académie des sciences française, de la National Academy of Sciences américaine, du GIEC (Groupement Intergouvernemental des Experts en Climat) et des autres sociétés savantes, dont les conclusions concordent :

- ✓ La collecte des données de l'ensemble des stations météo mondiales permet d'avérer une montée de température moyenne du globe d'amplitude encore modeste (approchant le degré sur un siècle), mais de rapidité sans précédent depuis 10 000 ans (figure 8).

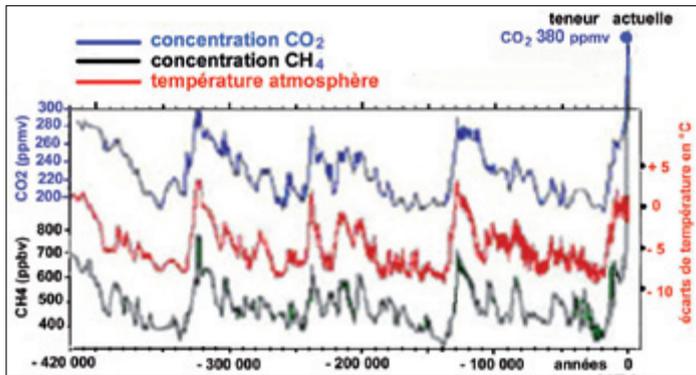
Figure Fig 8
(d'après documents GIEC)



- ✓ Sans avoir besoin de se référer aux mesures précises des climatologues et aux modélisations prédictives, on observe déjà une fonte spectaculaire des glaciers et de la banquise arctique, cette dernière perdant 20% de sa surface de glace pérenne depuis 1980, une fonte inquiétante du permafrost de l'Alaska nord et de la Sibérie où sa température est montée de 3 à 5°C en une vingtaine d'années, une remontée de la faune marine des zones tropicales vers le Nord de plusieurs centaines de kilomètres, de même qu'une remontée semblable des vecteurs de maladies tropicales.
- ✓ Cette augmentation de température coïncide avec une augmentation de la teneur de l'atmosphère en gaz carbonique sans précédent depuis 420 000 ans (Figure 9), recul permis par les carottages dans les glaces fossiles de l'Antarctique. Les cycles de glaciation et de réchauffement, espacés d'environ

100 000 ans¹ sont initiés par des variations à peu près périodiques de l'excentricité de l'orbite terrestre autour du Soleil ce qui a pour conséquence de modifier l'intensité de l'ensoleillement et sa répartition aux différentes latitudes. Ces cycles sont fortement amplifiés dans les zones polaires par l'énorme différence d'albédo (coefficient de réflexion solaire) entre glace/neige et eau/terre provoquant des avancées et des reculs

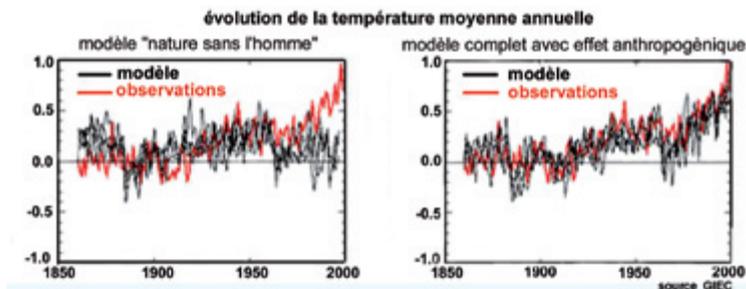
Figure 9



✓ La corrélation entre réchauffement climatique et activités humaines est confirmée par des modélisations de plus en plus précises, qui deviennent de plus en plus crédibles (figure 10).

Figure 10

(document GIEC)

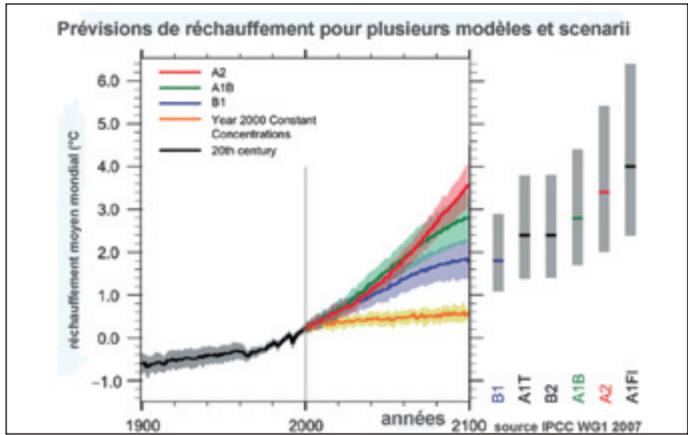


1. D'autres processus moins marqués interviennent avec d'autres périodicités : la variation d'inclinaison de l'axe des pôles (~ 40 000 ans), la précession (~26.000 ans), créant des oscillations entre périodes glaciaires d'environ 10 000 ans et interglaciaire de 10 000 à 20 000 ans. Nous sommes actuellement dans une période interglaciaire depuis environ 10 000 ans.

Les craintes d'un réchauffement

La projection de ces modélisations laisse entrevoir en fin de siècle un réchauffement moyen de 2 à 5°C, plage la plus probable du degré d'incertitude en fonction des modélisations et des différentes hypothèses des scénarios possibles d'évolution démographiques et de politiques énergétiques (figure 11). Comme on l'observe dès maintenant, ce réchauffement sera beaucoup plus fort dans l'hémisphère Nord que dans l'hémisphère Sud. Cette dernière présente une plus grande proportion d'océans dont la capacité d'absorption calorifique est supérieure à celle des terres et, en outre, porte sur ses terres moins de populations et moins d'industries.

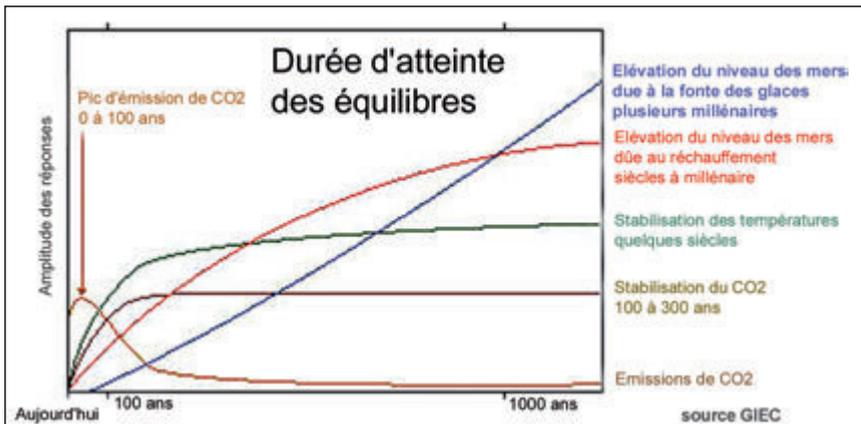
Figure 11



Les craintes associées à ce réchauffement concernent la montée du niveau des mers, principalement par dilatation de l'eau, une modification possible des courants marins qui pourrait affecter de grandes zones géographiques (on craint que le Gulf Stream - courant de surface dont le retour en eaux profondes se fait actuellement au Nord de la Norvège, avant de descendre vers la Caraïbes - plonge beaucoup plus tôt et ne vienne plus lécher les côtes Ouest de l'Europe, entraînant un refroidissement régional contraire au réchauffement mondial), des perturbations du régime des précipitations, désertification de certaines zones, augmentation de la fréquence des phénomènes météorologiques extrêmes. Les conséquences plus précises sont encore mal prévisibles aux niveaux régionaux, car elles exigent des modélisations plus fines, donc très complexes. Elles inquiètent néanmoins les gouvernements qui se sont groupés dans le GIEC pour assurer un suivi de l'analyse de ce problème et proposer des solutions.

Compte tenu des très grandes constantes de temps des phénomènes météorologiques mis en jeu, les conséquences de l'accumulation de gaz à effet de serre s'étendent sur de très longues durées (figure 12), il est donc urgent de prendre des contre-mesures. La figure 12 montre la très lente évolution des incidences environnementales dans l'hypothèse optimiste d'une limitation drastique des émissions de GES au cours de ce siècle, plus particulièrement en ce qui concerne la montée du niveau des mers.

Figure 12



L'Académie nationale de médecine, à l'issue de son colloque du 25 juin 2003 déclare : « l'Académie s'alarme des menaces que fait courir à la santé humaine, à l'échelle planétaire, l'augmentation de la teneur atmosphérique en gaz à effet de serre, qui se poursuit dans les pays industrialisés et sera inévitablement amplifiée par l'industrialisation des pays en développement qui dans l'état actuel des choses auront inévitablement recours aux combustibles fossiles ».

L'Académie des technologies considère l'accumulation des données scientifiques établies par les milieux compétents dans le domaine climatique comme des éléments convergents vers une probabilité de risque élevée, sur lequel les doutes légitimes sont limités. Le principe de précaution proportionnée exige donc que la technologie prenne en considération ce risque pour développer les remèdes qu'il est possible d'y apporter dans le domaine de l'énergie qui est l'objet de ce rapport.

✓ Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans «Rapports et communications», Commission énergie et changement climatique» le thème « Que peut-on faire contre le CO2 ? » : Le changement climatique et la lutte contre l'effet de serre. Le cycle du carbone. Les émissions humaines.

On peut lire aussi « l'effet de serre, allons-nous changer le climat » de H. Le Treut et JM. Jancovici. Flammarion et, bien entendu, se référer directement aux rapports du GIEC (IPCC en anglais) sur le site <http://www.ipcc-wg1.org>.

Annexe 2

Les énergies fossiles

2.1 Quel avenir pour le charbon ?

Le charbon génère 30 % des émissions anthropiques de CO₂ dans le monde. En France, il est perçu par le public comme un combustible polluant et désuet en voie d'abandon, mais ce n'est pas le cas des grandes régions charbonnières (Chine, Inde, Amérique du Nord), où il est de plus en plus affecté à la production d'électricité. Il est de plus défendu aux Etats-Unis par un formidable lobby et y retrouve un regain d'intérêt face à la montée du cours du pétrole ; son prix y a doublé dans les récentes années.

Au cours de la première période considérée (2020#2030), sa consommation sera en croissance de 35 à 40 %. Environ 90 % de cette croissance se fera par autoconsommation en Chine et en Inde. La croissance de production du charbon mis sur le marché mondial (moins de 20 % de la production mondiale) se fera dans les pays où les mines sont proches de la mer et des ports (Australie, Colombie, Indonésie, Venezuela), le transport maritime étant 10 fois moins cher que le transport terrestre.

Les inconvénients bien connus du charbon : c'est le plus polluant des combustibles (SO₂, Nox, CO₂, méthane des mines, métaux lourds des cendres), qui manifeste la plus forte nuisance sur la santé publique avec plusieurs milliers de morts chaque année (accidents de mines, silicose, maladies pulmonaires liées aux émissions). Il est donc pénalisé par la sévérité croissante des normes environnementales.

Il est, par ailleurs, coûteux en transport terrestre. En Chine, il mobilise exagérément le système ferroviaire pour son transport entre les mines et les lieux d'utilisation.

Les avantages du charbon : les réserves de plusieurs centaines d'années, bien réparties sur la planète (sauf Union européenne et Japon), le font échapper au risque géopolitique.

C'est une énergie « domestique » et économique, d'utilisation prioritaire pour les pays charbonniers.

L'indépendance énergétique assurée par le charbon constitue une forte motivation pour activer les recherches visant des utilisations plus propres.

De nombreuses améliorations sont en cours : depuis les chaudières à charbon pulvérisé, avec

traitement des fumées très répandues, les chaudières à lit fluidisé circulant, éliminant le soufre, aux cycles supercritiques améliorant le rendement vers 45 %, puis aux futurs cycles ultrasupercritiques le poussant vers 50 %. En première période (2020#2030), toutes ces technologies seront probablement mises progressivement en application en commençant par les pays développés et les grands pays charbonniers émergents (Chine), en suivant le rythme des investissements et des réhabilitations.

D'autres technologies plus ambitieuses sont en cours de développement. Elles ne peuvent présenter un intérêt qu'en seconde période en cas de pénurie énergétique et forte contrainte sur les émissions de CO₂. Dans cette catégorie, on peut citer l'oxycombustion en diverses variantes, facilitant la capture du CO₂, et l'IGCC, où une gazéification du charbon est intégrée à un cycle combiné. Le gaz de synthèse sans azote et comprimé peut y être plus facilement décarboné. Ce projet permettrait également la production d'hydrogène et/ou de carburant de synthèse. Ces filières et d'autres sont à l'étude pour extraire à partir du charbon un vecteur hydrogène, tout en capturant le CO₂. Pour toutes ces nouvelles filières, l'économie est encore loin d'être assurée, et la capture du CO₂ n'a d'intérêt que si sa séquestration est assurée¹.

Rappelons aussi qu'en dehors de son usage principal actuel de génération d'électricité, le charbon peut, par le procédé Fischer-Tropsch, être transformé en carburant pour les transports, procédé utilisé en Allemagne pendant la seconde guerre mondiale, puis en Afrique du sud. La montée du cours du pétrole amène à reconsidérer cette filière de production de pétrole de synthèse dont l'économie devient compétitive à partir d'un cours du pétrole de l'ordre de 70 à 80\$/bl.

Le charbon a deux fonctions sur la scène énergétique : d'une part, il intervient dans le processus de développement des géants démographiques comme la Chine et l'Inde, comme il est intervenu dans le passé en Europe ; d'autre part, il constitue le terme de bouclage du bilan mondial et il est, de ce fait, un modérateur irremplaçable du marché mondialisé. Si la séquestration du CO₂ est réalisable dans des conditions économiques et sûres, il pourrait même devenir un terme de bouclage des émissions de CO₂.

Le développement du gaz naturel et les efforts d'économie d'énergie pourraient entraîner jusque vers 2020 une période de transition au cours de laquelle la consommation mondiale de charbon verrait sa croissance, régulière depuis plus de cinquante ans, fléchir, sauf si des progrès rapides dans les technologies du charbon propre s'affirment entre temps. Ensuite, lorsque le prix des hydrocarbures et encore plus celui de l'électricité auront intégré la nouvelle donne marquée par la raréfaction des réserves d'hydrocarbures et l'internalisation des coûts de la limitation des émissions de CO₂, le charbon sera appelé, comme sans doute le nucléaire, à intervenir plus massivement dans le bouclage du bilan mondial. Il semble que, dans cette situation nouvelle, les

1. Voir sur le site de l'Académie le rapport «*Quel avenir pour le charbon ?* » et ses annexes et aussi «*10 questions sur le charbon* ».

réserves et les capacités de production de charbon « international » s'ajusteront pendant une longue durée, les hausses de prix à la source n'ayant pas une influence sérieuse sur le coût final de l'électricité.

Il n'y a donc pas lieu de croire que le charbon, malgré ses nuisances actuelles, va disparaître du paysage énergétique. Il semble aujourd'hui probable que les technologies en développement aboutiront à des degrés divers, et permettront au charbon de continuer à jouer pendant ce siècle le rôle de stabilisateur et de réserve qu'il a toujours joué dans le marché de l'énergie. Dans un premier temps, les améliorations de rendement de la chaîne charbonnière traditionnelle dans les pays en développement rapide comme la Chine, représentent un potentiel élevé de maîtrise des émissions, à un coût probablement modeste.

Il serait hautement souhaitable que ces progrès se diffusent rapidement. On pourra ensuite évaluer leur limite et apprécier la justification d'aller éventuellement au-delà, en fonction de la détermination montrée par les instances internationales dans la lutte contre l'effet de serre.

Les techniques de conversion en combustibles gazeux ou liquides ont connu des progrès importants et pourront encore bénéficier de réduction de coûts, notamment pour obtenir des produits nobles (gaz à haut pouvoir calorifique sans poussières) et peut-être la séparation de CO₂ à prix acceptables. C'est dans ce domaine qu'un saut technologique est envisageable.

Les constats et conclusions qui peuvent être tirés de cette analyse :

1. Dans beaucoup de pays du monde, la part relative du charbon a diminué récemment sur son débouché principal, qui est la production d'électricité ou de chaleur dans de grandes installations industrielles, en raison de la meilleure compétitivité du gaz. La récente hausse du prix du gaz ralentit cette tendance, au moins aux Etats-Unis.
2. La protection de l'environnement accroît et continuera à accroître la compétitivité relative du gaz.
3. Cependant, le charbon représente toujours un facteur fondamental de stabilisation du marché mondial des combustibles fossiles et il constituera un recours lorsque la raréfaction des ressources ou des contraintes géopolitiques fortes accroîtront fortement le prix des hydrocarbures (choc pétrolier inévitable) sur ce marché.
4. Des technologies à l'étude permettront de réduire fortement l'impact environnemental, y compris les émissions de CO₂; elles auront sur le coût de l'électricité un impact qui n'est pas actuellement compatible avec les prix du marché mais qui contribuera à établir le prix de marché lorsqu'il sera nécessaire d'y avoir recours.

5 Le charbon représente donc au niveau national un enjeu de sécurité future et de présence sur les marchés mondiaux d'équipement pour les industriels du secteur.

✓ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans « Rapports et communications », Commission énergie et changement climatique » le thème « Les énergies fossiles »; le rapport « Quel avenir pour le charbon ? » et ses annexes, et aussi dans la rubrique « 10 questions sur... »: « 10 questions sur le charbon ».*

On peut lire aussi sur le web : « le charbon propre, mythe ou réalité ? »

2.2 Le pétrole et ses contradictions

Les transports, en forte croissance, consomment les 2/3 de la production de pétrole, avec une prévision des 3/4 en fin de première période (2020#2030), alors que le pétrole est la source d'énergie fossile dont l'épuisement est le plus proche, son pic de production se situant vers cette fin de période. Les transports sont en même temps responsables d'environ 30 % des émissions de CO₂ dans les pays développés.

D'où deux axes de réflexion sur :

- ✓ la perspective de l'épuisement des réserves ;
- ✓ le remplacement du pétrole dans les transports, par des carburants plus propres et d'approvisionnement plus sûr.

Accroissement possible des réserves conventionnelles de pétrole naturel

Les réserves actuelles, de l'ordre de 160 Gtep, peuvent être approximativement doublées :

- ✓ **Par un meilleur taux de découverte** : dans les derniers 30 ans, le taux de découverte est passé d'environ 1 pour 10 forages à 1 pour 4 forages, grâce aux progrès de la géophysique (écho sismique 3D), et de la géochimie (modélisation de l'évolution des bassins sédimentaires), mais la taille moyenne des nouveaux gisements découverts a baissé de 50 %.
- ✓ **Par un meilleur taux de récupération**, amélioré d'environ 1/3 dans les derniers 30 ans, en moyenne mondiale, passant de 35 % à bientôt 45 % grâce aux progrès de la géophysique des gisements et des procédés de forage (forages horizontaux et intelligents). Schlumberger n'exclut pas d'atteindre 60 %.

Les réserves non conventionnelles

- ✓ **Les sables bitumineux** (Canada et Venezuela), porteurs d'huiles lourdes de forte viscosité, constituent une réserve énorme (~550 Gtep), dont une faible partie est jugée exploitable avec les moyens actuels (~100 Gtep?). Mais il est à noter que depuis quelques décennies, les perspectives d'utilisation de ces réserves se sont beaucoup améliorées : les huiles lourdes du Venezuela dont l'exploitation ne semblaient possible il y a quelques décennies que si le cours

du pétrole atteignait ~40\$/bl (alors qu'il était à ~10), est jugée maintenant envisageable à un niveau de 12 à 15 \$/bl (alors que le cours a récemment dépassé les 100 \$/bl).

- ✓ **Les schistes bitumineux**, contenant un pétrole incomplètement transformé, constituent une ressource potentiellement importante, mais dont l'exploitation est très consommatrice d'énergie et encore trop coûteuse actuellement.

Remarque sur les prix du pétrole

Les coûts moyens de production ont fortement baissé au cours des dernières décennies, de 14 \$/b en 1990 à moins de 8 \$/b actuellement. Ils sont environ de la moitié des coûts d'investissement de long terme (~15 \$/b). La grande volatilité des prix ces dernières décennies tient pour une part à des décisions politiques et, pour une autre part, à un retard des investissements nécessaires pour faire face à la demande, particulièrement forte en Asie.

De même que pour les grands réseaux électriques, il apparaît que la « puissance » appelée (puissance électrique, débit de pétrole) a un impact plus grand sur les prix de l'énergie (électricité en Californie et certains pays d'Europe, pétrole mondial) et sur les risques associés (pannes régionales ou nationales comme en Italie, crises pétrolières mondiales), que « l'énergie » accessible (centrales en réserves, réserves de pétrole).

Une théorie rationnelle qui retrouve de l'intérêt est celle d'Hotelling, où le prix d'une ressource épuisable, comme le pétrole, doit croître de manière telle que le marge entre prix et coût marginal soit indexée sur le taux d'actualisation. Une marge plus basse incite à une surexploitation rapide, une marge plus élevée incite à conserver le stock et réserver l'exploitation pour plus tard, seule l'égalité permet une exploitation régulière.

Des scénarios d'évolution sans choc existaient encore récemment (AIE, Shell), prévoyant 25 à 30 \$/b en 2020-2030, ils sont révisés à la hausse sur le long terme. De tels scénarios sont loin de la réalité actuelle.

- ✓ Le « pic » pétrolier : beaucoup d'incertitudes accompagnent les diverses prévisions et une date-clé pour l'évolution des choix énergétiques sera celle du retournement de la production pétrolière, désigné par les Anglo-saxons « peak oil ». Ce pic sera en fait probablement plutôt un plateau, mais le début de la baisse (ou même son anticipation à l'approche du maximum de production) sera un signal fort pour le réarrangement du mix énergétique mondial et l'urgence du remplacement du pétrole naturel. Sera-ce 2020 ou 2030 ?

Le sujet est controversé et deux écoles se sont formées : les pessimistes, essentiellement les géologues, qui considèrent que nous abordons très prochainement ce plateau (2010 ?), et les optimistes, essentiellement les économistes, qui, s'appuyant sur la progression des découvertes et taux d'exploitation des dernières décennies, et sur le fait que les pessimistes ont toujours eu

tort jusqu'à présent en sous-estimant toujours les progrès techniques et la réduction du coût des nouvelles technologies d'exploitation, misent sur une plus longue disponibilité du pétrole.

Que le pic pétrolier se situe vers 2010 ou 2030 n'efface pas le problème majeur : ce pic aura bien lieu, mais sa date influera naturellement sur le réarrangement plus ou moins rapide du « mix » énergétique.

✓ Remplacement du pétrole naturel dans les transports

Si les inconvénients écologiques du pétrole défraient la chronique par la répétition des marées noires, ses avantages sont en contrepartie immenses : haute densité énergétique, bas coût de production, relative sécurité d'utilisation, facilité d'emploi, bas coût de transport, de distribution et d'emploi résultant de l'état liquide et de cette haute densité énergétique.

Ni biocarburants, ni gaz, ni électricité, ni hydrogène ne réunissent tous ces critères, mais pourtant la nécessité de la substitution risque de s'imposer progressivement au cours de la seconde période (2030-2050) :

– On sait déjà réaliser des **carburants liquides** à partir du gaz ou du charbon (Allemagne pendant la seconde guerre mondiale et Afrique du Sud plus récemment) et le coût en devient acceptable à partir d'un cours du pétrole de l'ordre de 70 à 80 \$/bl. Compte tenu des divers moyens de produire des carburants liquides dédiés aux transports, à partir des différents hydrocarbures fossiles (charbon, gaz, pétroles non-conventionnels), un continuum se manifeste de plus en plus entre ces différents moyens, la différence de prix entre le pétrole classique et les sources non-conventionnelles s'atténuant au fil des années avec le progrès technique et la hausse actuelle et à venir de la source classique liée à sa raréfaction. Il devient envisageable qu'en 2020-2030 les pétroles non-conventionnels du Venezuela et du Canada puissent produire autant que le Moyen-Orient actuellement, à un coût acceptable. Dans tous les cas, la production de ces carburants liquides non conventionnels consomme beaucoup d'énergie, généralement fossile, ce qui augmente d'autant les émissions de CO₂ qui leur sont dues.

– **Le gaz naturel** a déjà pris une certaine part, réputée « verte » (partiellement) dans les bus des transports publics. Ne nécessitant pas de grandes transformations de la motorisation, il pourrait étendre encore cette part vers les voitures particulières si la durée de remplissage du réservoir ne constituait pas un frein. Gaz de France expérimente des compresseurs permettant de faire le plein à domicile le réseau domestique en temps masqué.

– **Les biocarburants**, qui dans des pays à climat et salaires favorables comme le Brésil prennent déjà une place importante, pourront intervenir de manière déjà significative mais restant plus modeste (~10 % dans la première période) en Europe où le climat, les salaires et les surfaces disponibles sont moins favorables. Ils restent coûteux et susceptibles d'entrer en concurrence par l'occupation des sols et l'usage de l'eau avec les autres finalités de l'agriculture. Une seconde

génération de biocarburants utilisant la partie ligno-cellulosique des plantes est en développement, qui étendrait considérablement le volume de production possible, notamment par la sylviculture. Quelles sont les baisses des coûts possibles et les volumes de production acceptables ? La production des biocarburants nécessite beaucoup d'énergie et, pour juger de leur intérêt, il est indispensable de faire un bilan complet sur tout leur cycle de vie.

- L'**hydrogène**, souvent évoqué comme carburant du futur, est handicapé par le très mauvais rendement thermodynamique de sa production et son coût élevé, ainsi que par ses propriétés physiques défavorables s'il est utilisé seul (faible énergie volumique). Légèrement recarbone et sous forme d'hydrocarbure de synthèse liquide, peut-il être un candidat de poids dans cette recherche ? L'utilisation massive d'hydrogène entraînerait une forte augmentation des besoins globaux d'énergie primaire.

Dans la troisième période (seconde moitié du siècle), la prospective est de plus en plus incertaine, mais on peut penser que la nature du carburant dominant dépendra fortement du choix du bouquet énergétique global, notamment vis-à-vis de l'énergie nucléaire (réacteurs VHTR permettant la production d'hydrogène par dissociation thermo-chimique de l'eau).

Conclusion : la raréfaction des ressources et une exploitation plus coûteuse augmenteront inévitablement le coût du pétrole dans les prochaines décennies. Des crises pétrolières sont possibles et il paraît prudent d'anticiper. Cette hausse entraîne des investissements dans les pétroles non-conventionnels qui pourraient apparaître sur le marché (mais avec retard sur la demande) pour des niveaux de cours se maintenant au-dessus de 50 \$/bl. Pour tenir compte de cette raréfaction du pétrole dédié en priorité aux transports, nous disposons de quelques décennies pour développer d'autres carburants et les motorisations associées. La plupart des voies possibles sont cependant très gourmandes d'énergie et, le plus souvent, risquent d'augmenter les rejets de CO₂.

✓ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans « Rapports et communications », Commission énergie-environnement le thème « Les énergies fossiles », le rapport du GT « pétrole » intitulé « Que penser de l'épuisement des réserves pétrolières et de l'évolution du prix du brut ».*

2.3 La séduction du gaz naturel

Le gaz est actuellement l'énergie fossile vedette et sa consommation s'envole :

- ✓ son utilisation demande peu d'investissements ;
- ✓ il est abondant et actuellement encore a un prix acceptable ;
- ✓ il émet environ 2 fois moins de CO₂ que le charbon ou le pétrole à puissance égale lorsqu'il est utilisé avec un bon rendement, sa molécule CH₄ n'ayant qu'un seul atome de carbone pour quatre d'hydrogène ;

Dans la production d'énergie électrique, il se substitue donc fréquemment au charbon (pollution) et au pétrole (raréfaction). Il peut aussi se substituer au nucléaire dans certains pays (radiophobie).

Son abondance est réelle, mais pas infinie

Les réserves prouvées (~ 130 Gtep) et espérées (~130 à 260 Gtep), permettent de tripler sa production d'ici 2050, mais les grandes réserves sont de plus en plus lointaines (Sibérie Arctique et Asie Centrale). Des ressources encore plus grandes existent sous forme d'hydrates de méthane dans les zones polaires et au fond des océans (basse température et hautes pressions). Elles sont jugées aujourd'hui inexploitable sur le plan économique et risquées sur le plan écologique, mais seul l'avenir pourra le confirmer.

La date de l'atteinte du pic de production de gaz naturel – probablement décalée de quelques dizaines d'années par rapport à celle du pétrole (voire moins, compte tenu de l'usage accéléré du gaz comme source d'énergie) – sera encore plus significative que celle du pétrole car la descente sera plus brutale (sauf exploitation des hydrates de méthane). Mais l'éloignement plus grand de ce renversement de tendance rend plus discutable sa localisation dans le temps.

La sécurité des approvisionnements en Europe ne peut se traiter qu'au niveau communautaire.

Son coût et son prix ?

Il est actuellement encore à un prix acceptable car les investissements lourds de son transport depuis les sites les plus proches sont amortis, et parce que l'Amérique du Nord était encore récemment autosuffisante. Cette situation ne devrait cependant pas durer: si l'on en croit le rapport Cheney, l'Amérique du Nord devrait rapidement devenir importatrice.

Les grandes réserves lointaines exigeront de nouveaux investissements très coûteux.

Son coût de production était encore récemment de l'ordre de 0,4 c€/kWh thermique, mais son coût de transport plus coûteux que celui du pétrole est de 0,4 à 0,8 c€/kWh th, soit un coût total interne de 0,8 à 1,2 c€/kWh th [2 à 3 \$/MBTU en unités anglo-saxonnes].

Le prix du gaz naturel dépendra également d'autres facteurs, notamment la prise en compte de coûts externes, la situation géostratégique, et les déséquilibres éventuels entre l'offre et la demande. C'est ainsi que depuis la crise californienne de 1999 – 2000, le prix du gaz aux Etats-Unis est passé de 2 à 6 \$/MBTU pour se stabiliser autour de 5 \$/MBTU. Le développement des transports sous forme de gaz liquéfié (GNL) tend à mondialiser le marché du gaz, et il ne semble pas déraisonnable aujourd'hui de tabler sur un prix durablement proche de 5 \$/MTU, soit 2 c€/kWh thermique.

Et est-il vraiment si propre ?

Il n'émet 2 fois moins de CO₂ que les autres combustibles fossiles qu'à condition d'être utilisé dans des installations modernes comme les centrales à cycle combiné, ce qui est loin d'être toujours le cas, et attention aux NO_x et aux fuites de méthane (~23 fois plus d'effet de serre que le CO₂). Si on prend en compte le coût externe des émissions, son coût interne (0,8 à 1,2 c €/kWh th) est renchéri de 1 à 2,5 c€/kWh th pour l'émission de CO₂, et de 0,3 c €/kWh th. pour l'émission de NO_x. Ces coûts peuvent être sensiblement réduits dans des installations modernes (cycles combinés par exemple) moyennant des investissements supplémentaires. Enfin n'oublions pas les victimes encore fréquentes des explosions accidentelles de gaz dans des immeubles ou des installations industrielles comme encore récemment en Belgique ou en France.

Son attrait pour les transports

Ayant une perspective d'épuisement décalée de quelques décennies (ou plus) par rapport au pétrole, le gaz est un candidat naturel au remplacement du pétrole pour les transports. Comme indiqué plus haut à la section pétrole, des solutions existent déjà et peuvent être améliorées. Dans la perspective d'une évolution lointaine vers une « économie de l'hydrogène » – dont il est beaucoup question actuellement (voir la section 'vecteur hydrogène') – le gaz serait la source la plus économique de production d'hydrogène par reformage si l'on fait abstraction des émissions de CO₂ qui l'accompagnent inévitablement. Cette évolution ne peut être envisagée qu'en période transitoire, sauf généralisation d'une séquestration du CO₂ économiquement et écologiquement acceptable.

Une de ses utilisations prioritaires devrait être le développement des pays pauvres

L'utilisation du gaz naturel comme source d'énergie (chauffage et électricité) n'exige pas un niveau technologique aussi élevé que certaines autres énergies comme le nucléaire ; le gaz est une forme d'énergie facilitant le développement des pays émergents. Le souci d'équité suggère que les pays développés ne se jettent pas inconsidérément sur cette ressource en en faisant monter le cours, et en permettant un accès prioritaire aux pays en voie de développement.

Conclusions : La croissance très rapide du gaz-énergie donne un sentiment d'euphorie qui ne doit pas retarder des décisions drastiques relatives aux économies d'énergie et à l'évolution du « mix » énergétique vers des sources plus propres et disponibles avec une sécurité plus grande.

Les pays riches devront veiller à ne pas monopoliser la consommation de gaz naturel, afin que les pays émergents puissent bénéficier de cette source commode à un prix acceptable pour permettre leur développement.

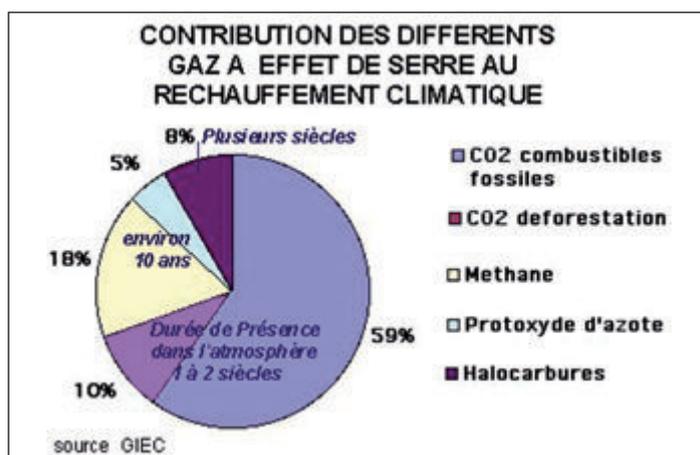
✓ Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans « Rapports et communications », Commission énergie-environnement, le thème « Les énergies fossiles » et le Rapport du GT « gaz naturel ».

2.4 Un regard transversal : que peut-on faire contre le CO₂ ?

Le CO₂ est le principal gaz à effet de serre d'origine anthropique s'accumulant dans l'atmosphère (la vapeur d'eau présente un effet de serre supérieur, mais dans un cycle naturel où les actions de l'homme ont peu d'influence et, par ailleurs, ne peut s'accumuler au-delà d'une concentration conduisant à sa condensation en pluie dans des conditions de température données).

La contribution du CO₂ au réchauffement climatique d'origine anthropique représente environ 70 % de l'effet de tous les gaz à effet de serre ; sa durée de présence dans l'atmosphère est de l'ordre du siècle avant que sa molécule soit cassée par le rayonnement ultraviolet ou les rayons cosmiques. Les deux autres GES les plus importants représentent en équivalent CO₂, 18 % pour le méthane CH₄ et 5 % pour l'oxyde nitreux N₂O, mais ces deux gaz ont une durée de vie beaucoup plus courte, de l'ordre de la dizaine d'années. En revanche, les divers halocarbures résultant d'activités industrielles, heureusement en moindre proportion ont des durées de vie plus longues que le CO₂, pouvant pour certains d'entre eux dépasser 1 000 ans.

Figure 13



Les émissions de CO₂ des divers pays sont fort disparates, qu'elles soient exprimées en tonnes par habitant ou en tonnes par unité de PIB. Le tableau B présente les émissions pour les pays du G8, les pays émergents et les autres, observés en 2004.

On y voit que les Etats-Unis – qui sont le plus le plus grand émetteur de CO₂, avec une consommation d'énergie principalement fossile de tep/h.an – seront bientôt dépassés par la Chine dont l'industrialisation intense et l'énergie principalement à base de charbon vont faire le plus grand émetteur mondial.

Beaucoup de scénarios ont cours pour proposer et évaluer des politiques énergétiques permettant de réduire les risques du réchauffement en limitant les émissions de GES. Un certain consensus, pas encore tout à fait mondial, considère qu'une limitation du réchauffement à +2°C en fin de siècle exige de diviser par 2 les émissions mondiales d'ici 2050, ce qui, en accordant aux pays qui ont encore besoin de se développer une plus grande latitude, conduit à envisager une division par 4 pour les pays développés. C'est notamment l'objectif déclaré en France par la Présidence de la République en 2006.

Le tableau B indique dans ses colonnes de droite un scénario d'émissions pour 2050 moins ambitieux, mais qui a semblé plus réaliste à ses auteurs (Price-Waterhouse-Coopers, 2006). Bien que moins ambitieux, ce scénario fait pourtant déjà appel à la capture-séquestration du CO₂ (CCS), évoquée aux **paragraphe 2.1 et section 9.9.3**, dont la technologie n'est pas encore développée.

Tableau B

Pays ou groupes de pays	Emissions de carbone en 2004		Un scénario d'émissions en 2050	
	(GtC)	%	(GtC)	%
Etats-Unis	1,66	22,9	0,84	13,8
Japon	0,35	4,9	0,16	2,6
Allemagne	0,23	3,2	0,10	1,6
Royaume-Uni	0,15	2,1	0,07	1,2
France	0,11	1,5	0,06	1,0
Italie	0,13	1,7	0,06	1,0
Canada	0,16	2,2	0,07	1,2
Russie	0,42	5,8	0,22	3,7
Total G8	3,21	44	1,58	26
Chine	1,25	17,3	1,55	25,6
Inde	0,32	4,4	0,70	11,7
Brsil	0,09	1,2	0,12	2,0
Mexique	0,10	1,4	0,15	2,5
Indonésie	0,08	1,2	0,17	2,9
Turquie	0,06	0,8	0,09	1,5
Total émergents	1,90	26	2,78	46
Autres	2,12	29,3	1,68	27,7
Total mondial	7,25	100	6,05	100

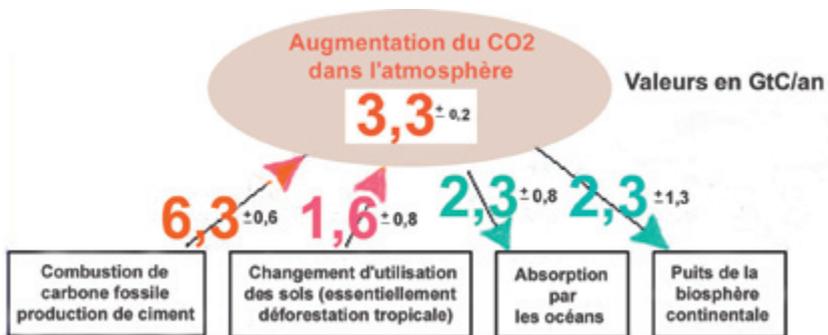
source PricewaterhouseCoopers Advisory : "Le taux mondial d'émissions de carbone va plus que doubler d'ici 2050"
d'après BP Statistical Review of World Energy 2005

Les origines de ces émissions de CO₂ sont également fort disparates et sont naturellement fonction des choix énergétiques propres à chaque pays. Une comparaison entre la France et l'Allemagne montre l'importante différence d'émission liée à la production d'électricité (France à majorité nucléaire, Allemagne à majorité charbon). La gravité du problème du transport y apparaît également : en France, c'est la première source de CO₂ sans espoir de pouvoir concentrer et stocker cette émission dispersée.

2.4.1 Stockage naturel du CO₂. Les flux du carbone

On voit sur la figure 14 que les émissions mondiales de CO₂ (7,9 GtC/an) excèdent les possibilités d'absorption par les océans et la biosphère continentale (4,6 GtC/an), la différence (3,3 GtC/an) s'accumulant dans l'atmosphère où la concentration de CO₂ augmente au fil des années.

Figure 14
(d'après Watson et al, 2000)



Le tableau C indique les capacités de stockage naturel respectives de carbone échangeable pour l'océan, la biosphère continentale et l'atmosphère. On y note la capacité gigantesque de stockage de l'océan profond et la faible capacité de l'atmosphère.

Tableau C
[document GIEC 2001]

RESERVOIRS NATURELS	STOCKS DE CARBONE (GtC)
OCEANS	~ 40.000 dont
océan superficiel	~ 1020
océan intermédiaire et profond (stockage pour milliers d'années)	38100
biomasse marine	3
carbone organique dissous	700
CONTINENTS	2190 dont
végétation (stockage dizaines d'années)	610
sols et détritiques organiques	1580
ATMOSPHERE	750

Afin de freiner cette accumulation de CO₂ dans l'atmosphère, un objectif est d'accroître la capacité d'absorption de CO₂, soit par la biosphère, soit par un stockage artificiel.

L'absorption par la biosphère peut être stimulée, principalement par reforestation

L'assimilation chlorophyllienne utilise l'énergie solaire pour transformer l'eau, les sels du sol et le CO₂ de l'air en cellulose, sucres, protéines (entre autres). Les végétaux absorbent du CO₂ pendant leur croissance. Lorsqu'ils sont brûlés, ils restituent ce CO₂. Lorsqu'ils se décomposent, ils émettent du CO₂ et du méthane.

La stimulation du stockage naturel par reforestation apporte une aide, au moins provisoire, à la lutte contre le réchauffement. Le coût de ce stockage semble être de l'ordre de :

- ✓ ~20 \$/tC pour les pays à végétation rapide et où le terrain est peu cher ;
- ✓ à ~75 \$/tC pour les pays industrialisés à climat tempéré et terrain cher.

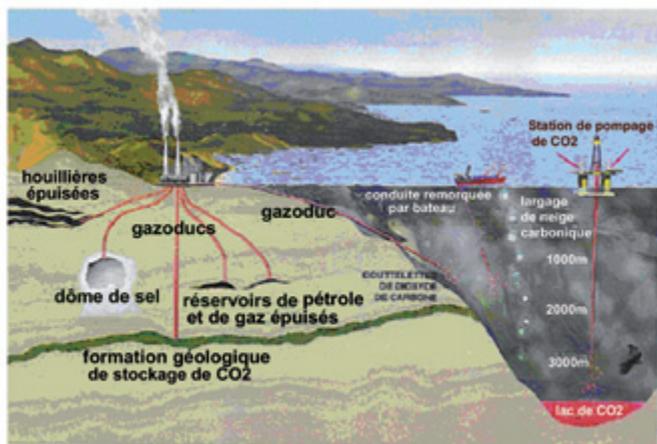
2.4.2 Stockage artificiel du CO₂

En dehors de l'océan profond dont la capacité de stockage est énorme, mais comporte des risques écologiques dissuasifs, on peut stocker en souterrain dans deux types de formations :

- ✓ des gisements charbonniers, pétroliers ou gaziers épuisés ou en voie d'épuisement, mais ils sont rarement proches des zones de production de CO₂ et leur volume global n'est pas à l'échelle des besoins de stockage ;
- ✓ des aquifères salins, dont le volume est de beaucoup supérieur, à évaluer avec plus de précision. Les chiffres extrêmement disparates et optimistes sur les capacités de ces divers stockages sont à considérer avec prudence. La convention de Londres de 1972 récusait ce type de stockage au même titre que celui du stockage dans l'océan jusqu'en novembre 2006 où le nouveau protocole de Londres l'autorise maintenant.

La figure 15 rappelle les diverses solutions plus ou moins utopiques envisagées pour le stockage artificiel, depuis l'immersion sous forme de lacs de CO₂ liquide en océan profond jusqu'aux sites miniers ou pétroliers terrestres et aux aquifères.

Figure 15



2.4.3 Quel est (et que pourra devenir) le coût du stockage souterrain ?

Les 3 composantes du coût de séquestration du CO₂ sont :

- ✓ la concentration et compression, dont le coût varie selon le type de centrale charbon (IGCC, PC ou NGCC), de 75 à 180 \$/tC, avec une incertitude de 30 à 50 %. Un objectif de 35 \$/tC a été fixé par le DOE pour 2020-2030 ;
- ✓ le transport par gazoduc, de l'ordre de 5 à 10 \$/tC par 100 km pour des grands débits ;
- ✓ la séquestration, de 0 à 35 \$/tC, dans les cas très favorables de vieux gisements pétroliers où le CO₂ aide à récupérer le pétrole résiduel, mais probablement de l'ordre de 100 \$/tC pour des stockages massifs en aquifères salins.

Des valeurs globales de 200 à 500 \$/tC sont citées pour les distances envisagées

2.4.4 Risques du stockage souterrain du CO₂

L'attention du public est plus attirée sur les risques du stockage des déchets nucléaires que sur ceux des déchets chimiques toxiques. Des voix, dont celle du Prix Nobel Carlo Rubbia commencent à s'élever sur des projets de stockage CO₂, rappelant qu'en cas de fuite, une concentration locale de CO₂ de 15 % est mortelle. Le tableau D indique les risques sur la santé selon le taux de concentration. En tout état de cause, le stockage souterrain du CO₂ soulève la question de sa pérennité à long terme. L'étanchéité des stockages souterrains par du ciment est problématique, l'acidité du CO₂ transformant les silicates du ciment en carbonates.

Tableau D

Concentration dans l'air	Effet sur la santé
370 ppm	Concentration atmosphérique actuelle Pas d'effet
< 1%	Pas d'effet physiologique
1% < X < 3%	adaptation physiologique sans conséquences adverse
3% < X < 5%	effets significatifs sur la respiration. Inconfort
5% < X < 10 %	Altération des capacités physiques et mentales Perte de conscience
> 10%	Rapide perte de conscience coma ou mort possible
> 25%	Mort imminente

Résumé des perspectives d'actions physiques possibles contre le CO₂ :

- ✓ La séquestration du CO₂ est une idée à prendre au sérieux, son développement viendra de pays comme les Etats-Unis et la Chine qui y ont un intérêt direct pour continuer à exploiter leurs ressources charbon. Ce développement stimulerait l'évolution vers une « économie de l'hydrogène ». Ses risques exigent une analyse approfondie.
- ✓ L'Europe du Nord y porte également un grand intérêt par les possibilités de stockage en aquifère salin sous la Mer du Nord.
- ✓ Mais on ne pourra jamais séquestrer les émissions diluées du CO₂ des transports, qu'on ne saura éliminer en amont que par une révolution des carburants qu'il faut préparer.

Le principe de précaution proportionnée invite à un effort de développement visant à séquestrer le CO₂ dans ses émissions concentrées (centrales thermiques, industries sidérurgiques...), mais à ne pas rêver d'une contribution suffisamment importante et proche de ce moyen au cours de la première période (~2020-2030) pour délaisser d'autres solutions au problème du réchauffement climatique. Il y a donc lieu d'approfondir les autres solutions à plus court terme, dont la première est d'économiser cette énergie qui nous oblige à un recours massif aux ressources fossiles limitées et polluantes.

- ✓ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans « Rapports et communications », Commission énergie et changement climatique le thème « Que peut-on faire contre le CO₂ ? », les rapports : « Capture et séquestration du CO₂ » et « Facteur 4 sur les émissions de CO₂ ».*

Annexe 3

Les économies d'énergie

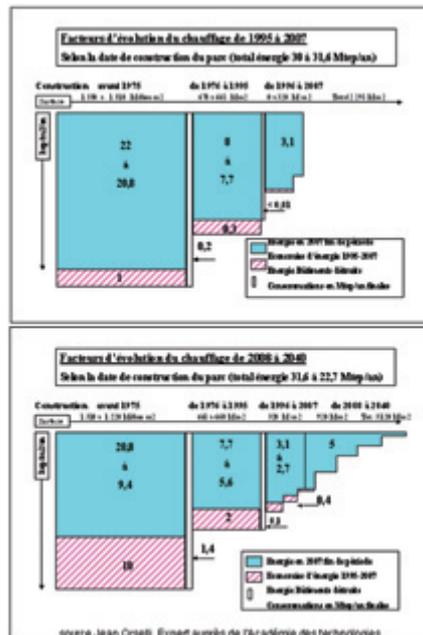
3.1 L'énergie dans le bâtiment

L'énergie consommée dans le chauffage, l'eau chaude sanitaire, l'électricité spécifique des bâtiments et les services urbains liés aux bâtiments représente en France près de la moitié de la consommation d'énergie, dans laquelle le chauffage et l'eau chaude sanitaire tiennent la plus grande part (30% de la consommation totale).

Dans cette consommation, la part des ménages est très majoritaire (67% contre 33% pour le tertiaire), ce qui représente une dispersion considérable des acheteurs qui manquent souvent d'information sur les meilleures technologies à retenir.

Au fil des années, l'isolation thermique des bâtiments neufs s'est considérablement améliorée ; la figure 16 montre l'évolution de la consommation d'énergie pour le chauffage selon les dates de construction.

Figure 16



Contrairement à l'énergie utilisable pour les transports routiers, où la substitution des carburants pétroliers apparaît très difficile et de très long terme, l'énergie utilisable pour le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire bénéficie d'une parfaite 'substituabilité' entre les diverses sources. On utilise indifféremment la biomasse (bois essentiellement), le fioul, le GPL, le gaz naturel, le solaire, l'électricité, la géothermie. Sous réserve de passer par l'intermédiaire de réseaux de chaleur de quartier ou de ville, certaines énergies renouvelables (déchets, géothermie) ou de récupération (cogénération, effluents de centrales électriques) sont aussi substituables aux précédentes. Leur seule limitation est d'être réservée à des urbanisations plus denses, qui représentent, toutefois, potentiellement les trois quarts du marché français. Cette 'substituabilité' donne une plus grande liberté d'action dans les mesures qu'il est possible de prendre pour réduire les émissions de CO₂ pour une consommation énergétique donnée.

Le domaine de l'énergie dans le bâtiment est cependant paradoxal au point de vue des gains d'émission de carbone fossile : il existe de nombreuses « actions à coût négatif » possibles, c'est-à-dire dont l'équilibre économique est largement assuré par les économies d'énergie qui compensent très largement les coûts, ceci grâce à l'emploi de technologies bien connues et déjà commercialisées.

La principale raison pour laquelle ces gains ne sont pas déjà réalisés est l'extrême dispersion des acheteurs et leur manque d'information sur le choix des meilleures technologies. Au bout de plusieurs décennies d'actions dans le domaine, force est de constater le clivage entre deux types de pays :

- ✓ ceux, comme la France, où ces « meilleures technologies » restent cantonnées au marché des bâtiments neufs, et ne se répandent pas dans le marché des bâtiments anciens malgré les efforts d'information des fabricants de ces produits ;
- ✓ ceux, comme l'Allemagne, les pays du Nord en général, l'Italie, où ces « meilleures technologies » occupent la quasi-totalité du marché¹.

Plusieurs **autres types « d'actions à coût positif »**, c'est-à-dire dont l'équilibre économique n'est pas assuré, restent néanmoins acceptables en termes de coût par tonne de carbone émise évitée. Ce sont l'utilisation du bois de chauffage, et des énergies liées aux réseaux de chaleur : géothermie, déchets, biomasse, ou la cogénération.

Toutes les autres actions, non seulement ne sont pas équilibrées économiquement, mais font apparaître des coûts très élevés si on fait leur bilan en termes de coût par tonne de carbone fossile évitée. Pourtant, elles ont trouvé place dans le passé dans les programmes d'économie d'énergie et font encore actuellement partie des programmes de lutte contre le changement climatique, comme les chauffe-eau solaires ou les pompes à chaleur sur nappe phréatique. Les raisons communes à ces politiques sont leur connotation « écologique » marquée jointe à l'existence de niches où

1. Bien entendu, ce type d'action s'est fait avec des fortunes diverses selon les pays et les domaines sectoriels.

ces techniques sont rentables (ou équilibrées économiquement), mais qui ont été abusivement élargies. Cependant, la montée du cours du pétrole autorise de plus en plus cet élargissement et on peut penser que ces actions auront de moins en moins besoin d'être subventionnées. À noter que leur développement nécessite la formation des corps de métiers adéquats, ce qui n'était pas encore le cas dans la décennie 1990-2000 et a conduit à quelques déceptions des utilisateurs.

Pour une stratégie de réalisation des actions à coût négatif

Les actions sont récapitulées dans le tableau E (France), qui indique celles à coût négatif, prioritaires, et les autres. Un ordre de grandeur des « gisements d'économie d'énergie » est estimé dans un certain nombre de cas.

Tableau E

Actions	consommation actuelle (Mtep/an)	temps de retour (ans)	coût par tonne de carbone (€/t)	Gisements gain ou substitution Mtep/an
Lors rénovation vitrages huisseries	10	1 à 2	négatif	50 %
Lors rénovation chaudières chauffe-eau	45	1 à 2	négatif	15 %
Lors rénovation toits + qq. façades	10	5	négatif	60 %
Lors rénovation éclairage	4	< 1	négatif	65 %
Lors rénovation pompes de chauffage	3	3 à 5	négatif	33 %
Autre électricité spécifique	20	1 à 5	négatif	10 à 30 %
Chauffage au bois*	6		125/200	12
Réseau chaleur (énergies renouvelables)	1		< 200	5 à 10
Anticiper changement chaudière	5 ?		0 à 250	
Anticiper changement vitrages	10		800 à 1 100	
Anticiper rénovation façades toits	30	> 30	1 200 à 3 000	
Chauffe-eau solaire, pompe à chaleur**			> 1 000	2 à 5 ?
Construction en bois (marché établi)	1/an		Négatif	

* Le coût se rapporte aux taxes perçues sur le bois (les prix Hors Taxes sont analogues avec le FOD et le gaz). Rappelons les nombreuses externalités positives pour le chauffage au bois.

** Sauf très rares « niches » proches de la rentabilité.

En résumé, on peut poser les quelques conclusions suivantes pour la France, où le secteur des bâtiments est une pièce maîtresse de la lutte contre le changement climatique, car il représente près de 50 % des consommations :

1. La priorité doit être donnée aux nombreuses « actions à coût négatif » qui ne demandent que de prendre des mesures réglementaires déjà appliquées dans divers pays européens. L'urgence d'une décision est à souligner, la durée de vie des « mauvais matériels » implantés entre temps dépassant 30 à 50 ans.

2. Le bois de chauffage représente déjà près de 12 % de la demande de chauffage et d'eau chaude actuelle. Son développement se ferait nettement au dessous du coût de l'énergie importée. Mais, l'exigence actuelle de percevoir des charges sociales sur ce secteur (et une TVA à taux normal) ont limité ce marché à l'autoconsommation et au marché noir. Le gisement est considérable : 8 à 12 Mtep/an.
3. Les réseaux de chaleur utilisant des énergies renouvelables (déchets, géothermie, biomasse) ou la cogénération, offrent des possibilités de gains d'émission de carbone fossile à des coûts encore modérés.

Les besoins en technologies nouvelles sont très limités pour l'application de ces actions. Les voies technologiques d'avenir exigeant un volume important de R&D pourraient être les piles à combustible, les récupérations sur les usines nucléaires électriques, le chauffage direct par réseau de chaleur sur usine nucléaire dédiée (sans production électrique).

✓ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans «rapports et communications», Commission énergie et changement climatique» le thème «Economies d'énergie dans l'habitat»*

3.2 L'énergie et les transports routiers

Dans les pays développés, les transports routiers sont responsables d'environ 30 % des émissions anthropiques de CO₂ (environ 20% au niveau mondial). La maîtrise des émissions de CO₂ dans les transports représente donc un défi majeur dans la perspective de l'accroissement de la mobilité des biens et des personnes qui accompagne tous les processus de développement.

La réduction des consommations énergétiques des moyens de transports routiers (soit 80% des consommations de tous les transports) résulte de compromis complexes, d'abord au niveau des caractéristiques des véhicules et des infrastructures routières, ensuite dans le domaine comportemental des clients et usagers du transport routier.

En effet, les contraintes en termes de sécurité et de réduction des émissions ainsi que l'évolution des demandes des clients en agrément de conduite et confort entraînent un accroissement de poids et de consommation électrique qui ne vont pas dans le sens d'une économie d'énergie. Dans cette problématique, l'ensemble du véhicule doit être considéré : allègement, réduction des frottements, aérodynamique, bilan thermique, et bien évidemment le rendement de la chaîne de traction.

Mais les consommations énergétiques de la mobilité par la route dépendent aussi de la dynamique économique et du comportement des personnes. Chaque pourcentage de croissance entraîne une augmentation de mobilité. Chaque avancée sociale ou recherche de qualité de vie entraîne

également un accroissement de mobilité avec une forte part de transport routier : réduction du temps de travail, tourisme et loisirs, urbanisme.

Dans ces domaines les arbitrages des individus vont plutôt dans le sens d'une mobilité accrue.

3.2.1 Constat sur les évolutions actuelles

a. Émissions globales du transport routier

Les Etats recherchent les moyens d'inciter à la réduction des émissions de CO₂ des transports routiers. L'Europe, contrairement aux Etats-Unis, a voulu s'engager dans une perspective forte de réduction en accord avec le processus mis en place à Kyoto. Les constructeurs automobiles européens ont négocié un accord – pour éviter des mesures coercitives – sur une cible d'émission (par kilomètre parcouru selon un cycle normalisé, sur la moyenne des véhicules d'un constructeur produits dans l'année), définie pour 2008 à 140 g CO₂ (38 g de C) avec une option pour 2012 à 120 g (33 g de C). En 1999, les émissions moyennes en Europe étaient de 190 g/km, avec des variations très fortes d'un pays à l'autre (de 170 g/km au Portugal à 215 g/km en Suède).

L'atteinte de ces objectifs correspond à une réduction en une quinzaine d'années de l'ordre de 30%. Jusqu'en 2000, l'évolution des émissions automobiles (moyennes mesurées chaque année dans l'UE par l'Association des constructeurs européens d'automobiles (ACEA), sous contrôle de la Commission européenne) est légèrement plus favorable que la courbe cible.

Rappelons que ces chiffres (spécifiques d'un véhicule type neuf sur un cycle normalisé) ne se répercutent sur les consommations réelles qu'avec un délai de l'ordre de 10 années, car la durée de vie moyenne d'un véhicule est comprise entre 10 et 15 années. Ils ne tiennent pas compte de l'accroissement du parc (1% par an au minimum en Europe de l'Ouest) ni de l'augmentation des distances parcourues et du développement de certains équipements comme la climatisation.

Pour les dix prochaines années, il apparaît donc comme assez probable que, à l'échelle mondiale, la contribution des Transports routiers aux émissions de CO₂ poursuivra son augmentation.

b. Les évolutions technologiques pour la réduction des consommations

La réduction des consommations intrinsèques des véhicules routiers est obtenue par l'action sur différentes parties du véhicule. La masse, la résistance au roulement, l'aérodynamique, le rendement de la chaîne de traction sont les quatre facteurs qui influencent le plus fortement la consommation.

Des efforts importants ont été effectués sur la masse des véhicules. Mais, en face des exigences de performance en sécurité, des demandes en confort acoustique et de la multiplication des équipements, ces efforts ont seulement permis de limiter cette dérive des masses. Le potentiel important de réduction des masses apportées par l'utilisation en structure et carrosserie de l'aluminium tarde à devenir réalité en grande série à cause des difficultés de mise en œuvre

industrielle et des surcoûts que le client n'est pas encore prêt à payer.

Les manufacturiers de pneumatiques ont travaillé à la réduction de la résistance au roulement et réalisé des avancées significatives. De même, l'aérodynamique est un gisement de progrès intéressant (les rétroviseurs extérieurs entraînent une consommation équivalente à celle d'une masse supplémentaire de cinquante kg), mais les contraintes de style ne vont pas dans le bon sens (les véhicules à assise haute ont un grand succès).

Reste le rendement de la chaîne de traction dont chaque pourcentage de progrès se répercute directement sur la consommation.

c. L'évolution des chaînes de traction avec moteur à combustion interne

Le moteur à combustion interne - qui semblait à la fin des années 1980 atteindre son plafond, aussi bien en diesel qu'en essence - a vu apparaître dans les années 1990, un ensemble d'évolutions profondes qui apportent des perspectives intéressantes de progrès en consommation. Cette tendance se poursuit dans ces années 2000. Notons les récents moteurs diesel à injection directe par rampe commune et les évolutions à venir des moteurs essence (injection directe, soupapes pilotées, compression variable, combustion homogène,...).

Dans la chaîne de traction, outre le moteur, la transmission peut apporter sa contribution aux économies de carburants. En particulier, les véhicules à propulsion hybrides, thermique et électrique, présentent des potentialités intéressantes. Les hybrides séries ont des limitations qui restreignent leurs applications aux véhicules électriques munis d'un groupe électrogène (dit « range extender »). Les hybrides parallèles, où les deux types d'énergie se recombinent au niveau de la transmission mécanique aux roues, peuvent apporter des sources d'économie intéressantes : récupération de l'énergie de freinage, arrêt du moteur quand le véhicule doit s'arrêter dans la circulation, aide au démarrage et à l'accélération permettant l'utilisation d'un moteur plus petit. Les hybrides apportent aussi un bon agrément de conduite et, pour certains d'entre eux, la possibilité de fonctionner dans certaines zones en mode électrique sans émissions.

Cependant, ces avantages sont fortement pénalisés par les surcoûts importants dus au cumul de deux systèmes de propulsion, des batteries beaucoup plus sophistiquées et un contrôle électronique de haut niveau. Ce surcoût a, pour l'instant, ralenti fortement la sortie de nouveaux véhicules de ce type.

L'ensemble de ces évolutions jusqu'en 2020 pourrait permettre de diminuer la consommation spécifique des véhicules de 40% à 50%, ce qui permettrait de compenser le développement de l'automobile pendant cette période (la Chine en 2010 devrait voir son marché annuel dépasser 5 millions de véhicules).

Au-delà des hybrides mono-énergie actuels (où toute l'énergie de traction, même la part électrique,

provient du carburant contenu dans le réservoir), on espère le développement d'hybrides bi-énergie (carburant et électricité prélevée sur le secteur par recharge nocturne d'une batterie plus puissante permettant les parcours urbains quotidiens). Cette évolution, largement dépendante des progrès des batteries qui devraient permettre avec un poids acceptable des parcours de l'ordre de 100 km, apporterait un gain considérable sur les émissions de CO₂ dans un pays comme la France où l'électricité de recharge est très peu émettrice de CO₂. Elle permettrait également de réduire l'écart relatif entre la production électrique de pointe et la consommation nocturne, réduisant ainsi les besoins relatifs en puissance de pointe généralement plus émetteurs de CO₂.

d. Les carburants

La seule évolution possible dans cette courte période est celle de l'utilisation partielle de carburants issus de la biomasse à condition de choisir les bonnes filières : celles qui, de la source à la roue, présentent le bilan en CO₂ le plus favorable.

La filière gaz naturel sur une majorité du parc demanderait une infrastructure lourde donc un engagement politique fort avec un bilan CO₂ assez limité.

Un autre paramètre important est celui du prix des carburants à la pompe. D'après les expériences passées (1973), le comportement du consommateur utilisateur de voitures particulières montre une assez faible sensibilité aux prix des carburants. Un doublement du prix des carburants à la pompe, soit une multiplication par plus de cinq du prix du carburant hors taxe, a été « absorbé » en moins d'un an. À noter, toutefois, que ce constat ne s'applique pas aux transports routiers et autres utilisateurs professionnels qui ne paient pas la TIPP et ressentent plus directement les hausses du prix du pétrole.

3.2.2 Les perspectives à long terme

Au-delà de 2020, s'il se confirme par quelques événements climatiques extrêmes pouvant lui être attribués que l'effet de serre dû à l'augmentation du taux de CO₂ crée des situations dangereuses pour certaines parties de la planète Terre, des solutions drastiques de réduction des émissions de CO₂, en particulier par les transports routiers, devront être mises en œuvre, et ceci ne pourra se faire que par des ruptures.

Dans ces schémas prospectifs, l'hypothèse d'un découplage entre les énergies pour usages fixes et celles pour usages mobiles est probable car les technologies à faible CO₂ pour des usages mobiles sont bien évidemment beaucoup plus difficiles à développer. Cependant, les énergies pour les transports routiers pourraient connaître aussi un point de rupture ou de bifurcation rapide qui se produirait après celle des utilisations fixes. Quelles sont les voies de rupture possibles ?

a. Autres types de groupe motopropulseur

Le véhicule électrique pourrait être un candidat, mais ses chances sont minces. Les lois de la

physique ne prévoient pas un stockage d'énergie électrique beaucoup plus performant que celui de Li/Li+, donc des autonomies très limitées incompatibles avec des utilisations très larges de ce type de propulsion. D'autre part, en terme de bilan global CO₂, seule l'utilisation d'électricité d'origine nucléaire permettrait, dans cette option, de diminuer très fortement les émissions.

Le véhicule électrique hybride à générateur pile à combustible est la solution qui a fait l'objet pendant ces cinq dernières années des plus grands efforts de recherche, certains constructeurs automobiles y consacrant chaque année jusqu'à 200 millions d'Euros. Le rendement de 35 à 50%, nettement meilleur que celui du moteur thermique, ouvre des horizons intéressants, d'autant plus que le carburant le plus aisé à faire réagir dans la pile est l'hydrogène et qu'ainsi le produit de la combustion est de l'eau. Cependant, outre les problèmes de mise au point technologique de la pile, d'intégration dans un véhicule et de réduction des coûts, se pose la question de la distribution et du stockage à bord du véhicule de l'hydrogène soit sous forme liquide soit sous forme comprimée.

Certains constructeurs automobiles pensent que dans une phase intermédiaire le générateur pile à combustible sera doté d'un reformeur permettant d'utiliser des carburants hydrocarbonés classiques distribués par le réseau d'aujourd'hui. Dans ce cas, l'avantage en terme d'émission de CO₂ est très faible et le basculement du moteur thermique vers cette solution ne se fera probablement pas.

b. Autres carburants

Dans les usages pour le transport, l'idée de piéger le CO₂ à bord n'est pas réaliste. Les deux seules solutions pour abaisser drastiquement les émissions de CO₂ sont, d'une part, les carburants d'origine végétale dont le contenu en carbone a été prélevé dans l'atmosphère, à condition que leur mise en œuvre n'émette que peu de CO₂ et, d'autre part, la filière hydrogène. Cette deuxième filière doit aussi s'analyser en terme de bilan CO₂ total, du puits à la roue ou de la centrale nucléaire à la roue.

Notons que la filière Hydrogène intéresse aussi bien le moteur à combustion interne que la pile à combustible.

Il n'y a pas lieu ici de discuter des différentes filières de production d'hydrogène, centralisées, décentralisées, d'origine électrique ou autre. Mais il est important de remarquer que les options retenues pour les transports routiers ne pourront être indépendantes de celles prises par les autres utilisations. Donc après une phase de découplage, on pourrait constater une phase suivante de convergence.

3.2.3 Conclusion sur les transports

À court/moyen terme, pour les dix à vingt années à venir, le véhicule routier propulsé par un moteur thermique restera le plus utilisé. Des évolutions technologiques importantes, aussi bien

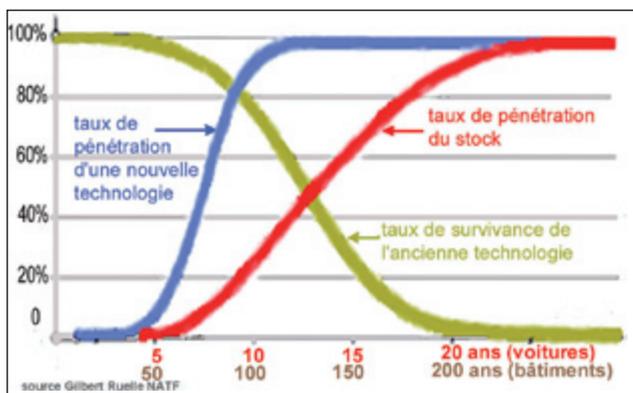
en diesel qu'en essence et en transmission hybride pourraient, par une diminution d'émissions spécifiques de l'ordre de 40 à 50%, limiter l'ampleur de l'accroissement des émissions de CO₂ dues aux transports routiers.

À court/moyen terme, si la diminution des émissions anthropiques de CO₂ s'avère absolument essentielle, le changement qui affectera le transport routier viendra des mutations des filières énergétiques générales de l'économie, mais ne les précédera pas. Si ces mutations conduisent vers l'hydrogène, les véhicules routiers auront deux options, celle du véhicule électrique à générateur pile à combustible ou celle d'un moteur thermique adapté à ce carburant. Si ces mutations sont orientées vers les ressources énergétiques d'origine végétale, le moteur thermique aura encore de beaux jours devant lui.

3.3 Que faire pour accélérer les économies d'énergie ?

Aux facteurs socio-économiques déjà cités s'ajoute pour l'habitat et les transports l'effet retard dû à la lenteur de l'impact d'une nouvelle technologie sur un parc existant. La figure 17 montre cet effet retard pour les véhicules et pour l'habitat, dont les échelles de temps sont approximativement dans un rapport de 1 à 10.

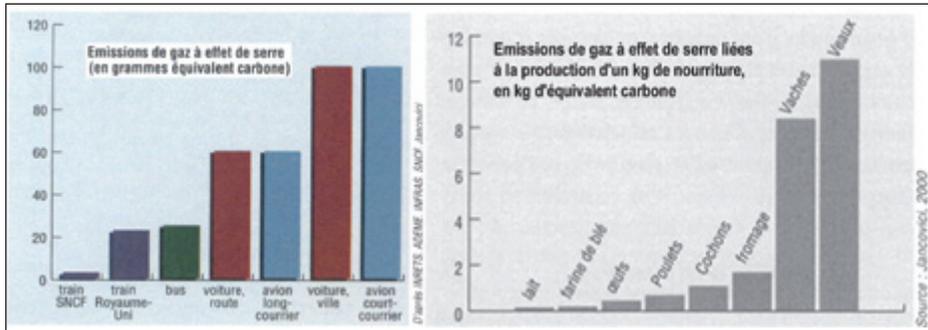
Figure 17
Effet retard des innovations



Les mouvements écologistes prônent un changement radical de notre mode de vie, évoluant vers une société plus sobre, par conviction et choix individuel, et aussi par contrainte (taxation du carbone, réglementations diverses).

À titre indicatif, les figures 18 et 19 montrent l'incidence de quelques moyens de transport et modes d'alimentation sur les émissions de GES.

Figure 18 et 19



Une fraction authentiquement écologiste de la population, très minoritaire jusqu'alors, essaie d'appliquer quelques recettes d'actes individuels qui vont dans le bon sens :

- ✓ baisser fortement le thermostat l'hiver et mettre un pull ; ne pas installer de climatisation pour l'été ;
- ✓ habiter un appartement desservi par les transports publics plutôt qu'un pavillon éloigné ;
- ✓ éviter les déplacements en voiture, préférer les transports publics et le vélo quand c'est possible;
- ✓ éviter de prendre l'avion, préférer le train ;
- ✓ manger peu de viande rouge ;
- ✓ acheter les légumes et fruits de saison, locaux, et aussi peu emballés que possible, préférer les ananas transportés par bateau aux ananas avion, etc. ;
- ✓ préférer une maison en bois (stocke le CO₂ quelque temps) à une maison utilisant du ciment (émet du CO₂).

La population dans son ensemble est-elle prête à suivre ces voies? On doit constater qu'aujourd'hui, l'application spontanée de ces mesures reste très limitée et ne correspond pas aux choix de la majorité des citoyens de nos sociétés. Il est probable que les développements technologiques ne suffiront pas à apporter à eux seuls un volume suffisant d'économies d'énergie et qu'une dose de contrainte sera nécessaire dans certains domaines.

Annexe 4

Les énergies renouvelables

Comme il a été dit dans le corps du texte, les énergies renouvelables inspirent un très large intérêt parce que, d'une part, ces énergies de flux et non de stock font appel à des ressources renouvelées dans les conditions climatiques actuelles et que, d'autre part, elles ne participent pas à l'augmentation des gaz à effet de serre.

Les énergies renouvelables portent, de ce fait, l'espoir de ceux qui sont attachés à la **protection de l'environnement** et souhaitent exploiter de **façon durable** les ressources de la planète. Elles en acquièrent une **valeur symbolique** forte, surtout dans les pays riches.

Les énergies renouvelables sont exploitées depuis très longtemps ; leurs principes sont bien connus. Elles ont bénéficié de tous les **progrès technologiques** qui accompagnent l'histoire de l'humanité. Mais la possibilité de mobiliser des ressources d'énergie renouvelable est très variable à la surface de la terre puisque le lieu d'extraction est commandé par le **milieu naturel**.

Certaines d'entre elles fournissent essentiellement de la chaleur (biomasse, solaire thermique, géothermie), d'autres de l'électricité (toutes les énergies mécaniques – hydraulique, vent - mais aussi le solaire photovoltaïque), quelquefois les deux.

Leur production globale a augmenté de 20% entre 1995 et 2005 mais leur part dans cette production électrique mondiale a baissé de 10%, passant de 20,2% en 1995 à 18,1% en 2005, par suite d'une croissance plus rapide des énergies fossiles.

À l'intérieur des énergies renouvelables, la participation de chacune d'elles à la production électrique en 2005 s'établissait comme suit : hydraulique 89,5%, biomasse 5,6%, éolien 3,0%, géothermie 1,7%, solaire 0,1%. On doit noter que la biomasse et la géothermie ont surtout des applications en chaleur et carburants et assez peu en production d'électricité.

4.1 L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique est la source d'énergie mécanique la plus ancienne connue (moulins).

C'est aussi **la reine des énergies renouvelables, comptant pour environ 90% de l'énergie électrique d'origine renouvelable dans le monde**. Elle produit annuellement ~ 3 000 TWh, soit environ 16% de l'électricité mondiale, du même ordre que le nucléaire, mais sa croissance (1,5%/an) est 2 fois plus

faible que la croissance globale de l'électricité (3,2%/an) car la plupart des sites possibles sont déjà équipés dans les pays développés. Sa part est donc en baisse dans la production électrique mondiale (19% en 1995, 16% en 2005).

Elle est perçue très différemment dans les pays riches qui ont le souci récent de reconstituer des conditions plus naturelles de vie (demandes de destruction de barrages pour protéger les zones de frai des saumons et protéger la pêche sportive aux Etats-Unis où sa production baisse de 0,2%/an) et les pays émergents qui n'ont pas atteint le même niveau de vie et donnent la priorité à leur développement en construisant des barrages (Chine et Inde où respectivement 50 GW et 10 GW sont en construction, Brésil, Turquie, Iran...).

Les qualités de l'énergie hydroélectrique sont connues : elle assure l'indépendance énergétique pour les pays qui disposent de cette ressource. C'est, certes, un investissement lourd mais de très longue durée de vie et de coût d'exploitation faible, assurant une énergie compétitive, souple d'emploi, mobilisable très rapidement par démarrage rapide, stockable et capable de faire face aussi bien à la demande de base que de pointe selon les sites. De plus, les équipements hydro-électriques sont souvent des équipements mixtes visant plusieurs autres objectifs (protection contre les inondations, navigation, irrigation, objectifs parfois divergents, exigeant des compromis sur l'utilisation).

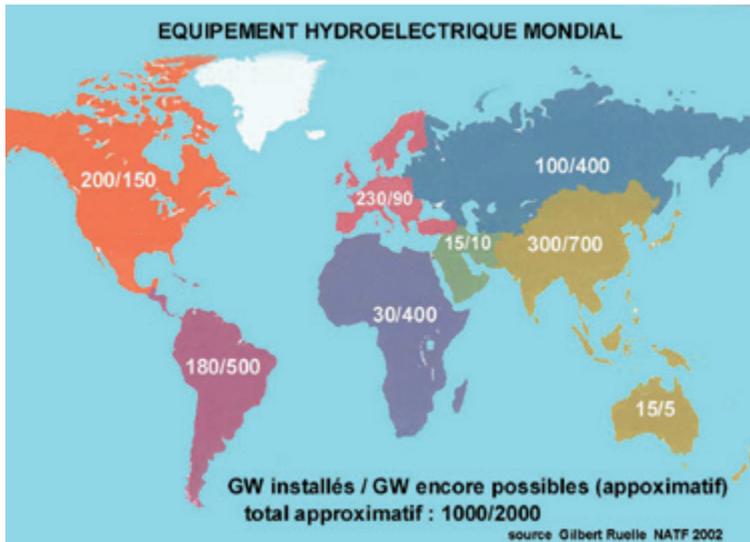
Les difficultés de développement qu'elle rencontre dans quelques pays tiennent essentiellement :

- aux déplacements de population nécessaires pour implanter les réservoirs, dont il faut négocier et organiser la réinstallation (Trois Gorges en Chine, Baie James au Canada) ;
- ✓ à une compétition avec le gaz naturel dans les régions qui ont les deux ressources (Afrique Occidentale, Turquie, gaz de Bolivie pour le Brésil et l'Argentine) et opposition des associations écologistes dans les pays riches, et même émergents, sous l'influence de certaines ONG des pays riches ;
- ✓ à ce que c'est une ressource dont la consommation est plutôt nationale ou régionale qu'internationale, car elle est difficilement transportable (forme électrique) à plusieurs milliers de kilomètres comme le sont le pétrole et le gaz¹.

Les avantages de l'hydraulique sont connus depuis si longtemps que dans les pays développés, les sites possibles sont déjà presque tous équipés. La figure 20 indique la répartition mondiale approximative des sites déjà équipés et de ceux restant à équiper.

1. Sous forme de courant continu ; c'est quand même fait au Canada vers le Nord-Est des Etats-Unis et au Brésil depuis Itaïpu vers Rio de Janeiro et Sao Paulo – et ne jamais oublier que le transport du gaz coûte cher, contrairement à celui du pétrole.

Figure 20



Et le petit hydraulique ? Après l'équipement du grand hydraulique, il reste quelques sites de petite puissance à basse chute, de coût plus élevé par unité d'énergie. Ces équipements peuvent être valorisés par une taxation du carbone. La puissance ainsi ajoutée pourrait atteindre 10% de celle du grand hydraulique, mais ces minicentrales rencontrent généralement les mêmes oppositions écologiques. Cette voie présente beaucoup d'intérêt dans les sites isolés des PVD disposant de rivières. Elles permettent de réaliser des microcentrales dont la puissance est adaptée aux besoins de l'artisanat et du développement rural.

Et l'énergie des mers ? La centrale marémotrice de la Rance (240 MW) fonctionne de manière satisfaisante, mais n'aura pas de successeur car les sites sont rares et les oppositions fortes. Dans le reste du monde, les sites à forte marée sont également rares et les oppositions analogues. Il faut mentionner, également, les tentatives d'utiliser l'énergie de la houle et des courants marins (hydroliennes), notamment en Grande Bretagne, sans développement significatif.

Que conclure sur l'énergie hydraulique ?

- **L'énergie hydraulique est à recommander partout où subsistent des sites équipables dans les pays en voie de développement.**

Dans les pays développés, il n'en reste pratiquement pas.

- **Moins de 10% des ressources hydrauliques énormes (400 à 500 GW) de l'Afrique intertropicale sont actuellement exploitées** parce que la consommation africaine n'est pas à l'échelle des équipements possibles. L'Europe ne devrait-elle pas y penser davantage ? Imaginer des financements de barrages développant et stabilisant ces pays et en extraire notamment des vecteurs d'énergie exportables accélérant le développement de ce continent et profitant aux deux économies ?

4.2 L'énergie éolienne

L'énergie éolienne fait l'objet d'un développement mondial récent et très rapide, surtout en Europe (+33 %/an) mais ne représente encore que 3 % des énergies renouvelables dans le monde et ne contribue encore que pour 0,5 % de la production électrique mondiale en 2005 avec environ 100 TWh. La puissance unitaire s'est également accrue rapidement, passant d'une moyenne de 460 kW en 1995 à 1 700 en 2005 ; des unités de 5 MW sont récemment apparues. La puissance totale mondiale installée était de 72 GW fin 2006 dont les 2/3 en Europe de l'Ouest.

Ce développement très rapide suit les subventions publiques à cette énergie réputée « verte » et on a vu dans différents pays le rythme des investissements ralentir lorsque les soutiens faiblissaient (Etats-Unis, Danemark).

Cette source d'énergie est souvent critiquée pour ses défauts tenant à son caractère diffus et aléatoire :

* **Diffus** : la faible densité de l'air conduit à des dimensions d'hélices très grandes, induisant un coût élevé et une forte occupation du sol par unité de puissance. Une turbine capte l'énergie cinétique du fluide qui la traverse. Sa puissance est proportionnelle au carré du diamètre et à la densité du fluide (1 000 fois plus faible pour l'air que pour l'eau), donc pour la même puissance et la même vitesse de fluide, le diamètre d'une éolienne doit être une trentaine de fois ($1\,000^{0,5}$) plus grand que celui d'une turbine à eau. C'est pourquoi il faut une éolienne de 80 mètres de diamètre pour seulement 2,5 MW, alors qu'une turbine hydraulique de 2 à 3 mètres suffit.

* **Aléatoire** : c'est une énergie intermittente et peu prévisible (caprices du vent). De plus, la puissance de l'éolienne varie comme le cube de la vitesse du vent et est donc très faible par faible vent. Au-delà d'une certaine vitesse de vent, on doit arrêter la production d'énergie, par sécurité, en mettant les pales en drapeau. La durée de fonctionnement équivalent à la pleine charge qui en résulte est donc faible (20 à 25 %), augmentant d'autant le prix du kWh. Cette énergie mal prévisible ne peut contribuer que faiblement à la puissance garantie du réseau et à sa stabilité. De ce fait, sa valeur commerciale est réduite à la valeur du combustible qu'elle permet d'économiser lorsqu'il y a du vent.

Participant difficilement à la garantie de puissance², les éoliennes ne peuvent venir qu'en complément d'autres moyens de production comme l'hydraulique³, le thermique charbon ou les turbines à gaz, utilisables à volonté, ce qui évidemment renchérit le coût global et atténue le caractère « vert » et « renouvelable » de l'énergie éolienne lorsque le secours est apporté par des turbines à gaz ou des centrales à charbon.

2. Participer à la garantie de puissance exige des parcs importants répartis dans des zones de vents de régimes différents et complémentaires (côtes de la Manche et Golfe du Lion, par exemple).

3. Au Danemark, où l'éolien atteint le quart de la puissance, c'est l'hydroélectricité de Norvège et le réseau allemand qui assurent la stabilité du réseau et la continuité de la production.

La pénalisation de cette intermittence serait réduite si l'énergie électrique imprévisible pouvait être stockable ou économiquement utilisable, par exemple, pour la production d'hydrogène par électrolyse envisagée dans beaucoup de projets de recherche, mais les chimistes font remarquer que les procédés complexes nécessitent un fonctionnement en continu.

L'éolien en Europe

Malgré son coût de production élevé (kWh 2 à 3 fois plus cher que nucléaire ou gaz), l'éolien se développe en Europe plus qu'ailleurs grâce à des tarifs subventionnés, justifiés par son absence d'émission directe de CO₂ et par l'espoir qu'un développement industriel abaissera suffisamment ce coût et le rapprochera de celui des énergies fossiles qui entre temps aura augmenté.

Une directive européenne fixe pour 2010 un objectif de 22 % à la contribution moyenne des EnR dans la production électrique en Europe. La France, dont l'objectif est fixé à 21%, atteint déjà environ 13 à 14 % de sa consommation intérieure en EnR grâce à une forte proportion d'énergie hydroélectrique. Les centrales éoliennes y sont encore peu nombreuses, situation très différente de celles de nos voisins :

En 2007 Allemagne ~ 20 GW, France 11,5 GW, Espagne 12 GW, Danemark 3 GW.

L'éolien en Allemagne représente ~ 5% de la production électrique, dominée par le charbon et le gaz (~60%), ainsi que par le nucléaire (~30%), alors qu'en France il ne représente que ~0,5 %.

Pourquoi cette particularité de la France ? L'énergie d'origine éolienne y coûte 5 à 8 c€/kWh, mais l'impossibilité de garantir la puissance réduit sa valeur réelle à celle du combustible qu'il remplace, soit 2 à 4 c€/kWh s'il remplace du fossile, mais moins de 1 c€/kWh s'il remplace du kWh nucléaire. Les pays qui développent activement l'éolien sont donc ceux où il remplace du kWh charbon, à un coût du même ordre et en évitant l'émission de CO₂ qui sera bientôt pénalisée (Allemagne, Espagne, Danemark).

Quelques autres difficultés de l'éolien :

- Sa faible densité énergétique au sol, même sur les sites côtiers les plus favorables⁴, le met en conflit d'utilisation du territoire avec d'autres usages, notamment l'occupation résidentielle et touristique.
- Sa forte dépendance à la force du vent. Citons, à titre d'exemple, la politique publique allemande qui a conduit à répartir des éoliennes sur tout le territoire. Pour une puissance de 20 GW (2006), la production annuelle ne dépassait pas 30 TWh, soit une durée de fonctionnement à l'équivalent de pleine puissance de 1 500 heures par an, soit 17%. Des éoliennes installées sur de bons sites côtiers ou 'off-shore' pourraient produire plus du double.

4. 8 MW/km² **GR note** « à vérifier avec les grosses puissances unitaires 2 à 5 MW ; Région Centre 244 MW, Région languedoc-Rousillon 215 MW, Région Bretagne 168 MW

- Sa liaison à un réseau de distribution : la faible puissance individuelle (sauf fermes d'éoliennes) oblige à une liaison moyenne tension (~ 20 kV, HT trop chère). En parcs marins, une inter-liaison BT des éoliennes doit aboutir à un transformateur d'évacuation en HT vers le réseau de transport dont les points d'insertion sont coûteux.
- La faible inertie spécifique de l'hélice limitant la participation au maintien de la stabilité de fréquence.
- Les pics de chaleur de l'été, de même que les pics de froid en hiver, correspondent fréquemment, en Europe, à des conditions anticycloniques peu favorables au fonctionnement des éoliennes, alors que ce sont des périodes de forte consommation d'électricité.

Quelles sont les niches favorables à l'énergie éolienne ?

- Dans certains pays développés où elle complète une énergie à combustible cher et polluant (dans une proportion limitée par la qualité réduite de l'énergie électrique qu'elle délivre).
- Dans les zones géographiques où le vent est régulier (les alizés) et le prix du terrain peu élevé, des fermes d'éoliennes peuvent être établies. Des équipements importants sont réalisés au Maroc et au Sud de l'Espagne.
- Dans les zones isolées où le coût d'un réseau de distribution est prohibitif et dans les îles non reliées à un réseau de grand transport, des éoliennes individuelles avec stockage par batteries sont d'intérêt, mais le coût additionnel des batteries (à renouveler) et du convertisseur est pénalisant.

Des parcs éoliens en mer ?

La directive européenne, qui contraint la France à investir dans beaucoup d'éolien d'ici 2015, conduit à envisager l'implantation de fermes éoliennes en mer pour une part de l'ordre de 4 GW. Ces parcs éoliens regrouperaient des éoliennes de 3 à 5 MW implantées sur fonds marins de moins de 30 m, en puissance globale de 300 à 700 MW. Le coût par kWh de ces parcs en mer semble être de l'ordre du double (~13 c€/kWh, selon données allemandes) du coût à terre, bien que le vent soit en général plus rapide et plus régulier en mer.

Le soutien à l'énergie éolienne

Il est souvent avancé que les crédits publics français consacrés aux énergies renouvelables sont insuffisants. Il faut noter que si la France investit d'ici 2015 environ 17 GW d'éolien (prévu par le PPI 2006), au prix de rachat imposé à EDF pour cette énergie⁵, cela équivaut à une subvention annuelle de l'ordre de 1 milliard d'Euros au développement de cette énergie, ce qui est considérable.

5. 84 €/MWh à terre et 115 €/MWh en mer

On notera que le régime des subventions ayant changé au Danemark, les investissements éoliens ont pratiquement cessé depuis 2005 et qu'en Allemagne, les investissements annuels en éolien ont connu une baisse en 2004 et 2005, pour remonter à partir de 2006 grâce au «repowering» et au début des éoliennes en mer. En France, en revanche, des conditions d'obligation d'achat plus favorables décrétées en 2006 'boostent' ce type d'investissement.

Que conclure sur l'énergie éolienne ?

Elle apporte une contribution d'énergie partiellement 'verte' qui semble devoir rester très minoritaire malgré le soutien apporté, elle trouve sa place parmi les autres énergies renouvelables où son ordre de mérite global la situe actuellement derrière l'hydraulique, la biomasse et le solaire thermique.

Pour des raisons techniques, environnementales et économiques, il est illusoire de penser que la participation de l'éolien pourrait atteindre un niveau comparable à celui des énergies fossiles, hydraulique ou nucléaire.

4.3 L'énergie de la biomasse

Cette énergie entre pour une part importante au plan mondial (ff10%), mais l'essentiel échappe aux statistiques car il se situe hors marché, pour le chauffage domestique et la cuisson des aliments dans les pays en développement et dans les zones rurales des pays développés. La bioénergie se présente en effet sous trois formes principales :

- **Bioénergie** = biochaleur + bioélectricité + biocarburants, dont la composante biochaleur est très largement majoritaire.
- **Sous forme électrique**, la biomasse ne représente que 1 à 2% de l'énergie électrique mondiale, se positionnant toutefois en seconde place parmi les énergies renouvelables, loin derrière l'hydraulique, mais devant l'éolien. En Europe, la production d'électricité à partir de biomasse augmente de 12% par an, elle permet une production décentralisée et autonome d'électricité et de chaleur par cogénération, dont la rentabilité dépend beaucoup de la valorisation de la partie chaleur.
- **Sous forme de biocarburants**, la biomasse n'intervient encore que pour environ 1 % de la consommation mondiale de carburants, qui ne représentent eux-mêmes que ~25 % de la consommation énergétique mondiale.

L'énergie est extraite de la biomasse par diverses voies adaptées aux sources et aux besoins :

- **La combustion du bois et des pailles** : qui est la voie la plus ancienne et toujours la plus importante : **50% du bois mondial y est consacré**. La chaleur produite est essentiellement utilisée pour des besoins domestiques ; c'est la principale source d'énergie des populations rurales des pays

pauvres (~2,6 milliards d'hommes). Dans une beaucoup moins grande proportion, la chaleur est utilisée pour produire de l'électricité ou les deux en cogénération.

- La **méthanisation** : fermentation anaérobie de **déchets ménagers, déjections animales, algues**, donne du **biogaz** (50 à 60% CH₄, 35 à 40% CO₂), permettant une cogénération d'électricité et de chaleur.
- La **fermentation alcoolique** de **matières saccharifères** (betteraves, canne à sucre) ou **amylacées** (céréales) produit de l'**éthanol**, biocarburants des véhicules à essence. Le rendement énergétique est de l'ordre de 1,4 à 2 kWh récupérables pour 1kWh consommé dans le procédé.
- L'extraction de l'huile des **matières oléagineuses** (colza, tournesol, soja, palme) et son **estérification** avec du méthanol produit un autre biocarburant, le **biodiesel**. Rendement énergétique de l'ordre de 2 à 3 kWh/kWh.
- En filière future, la **fermentation enzymatique** ou la **transformation thermochimique** par gazéification des **matières ligno-cellulosiques** (bois et pailles) promettent le meilleur rendement énergétique (2,5 à 4 kWh/kWh), mais demandent encore beaucoup de développements.

4.3.1 La combustion, le bois-énergie

La forêt des zones tempérées s'accroît (la France est passée de 8 à 15 millions d'hectares en 200 ans), mais la forêt mondiale se réduit par la déforestation tropicale et a perdu 135 millions d'hectares depuis 1980. La moitié du bois mondial est brûlée pour le chauffage et la cuisine dans les PVD, sans souci suffisant de reforestation.

En Europe, la reforestation est bien gérée et permet d'en tirer une énergie renouvelable de 47 Mtep en 2000 (France en tête 9,8 Mtep, Suède 8,3 Mtep, Finlande 7,5 Mtep, Allemagne 5 Mtep...), presque totalement thermique soit 2.6 % de l'énergie consommée (3,9 % pour la France).

Les technologies de combustion évoluées permettent de produire de l'énergie en cogénération d'électricité (30%) et de chaleur (70%). Dans les pays riches en forêts, la production d'énergie à partir du bois devrait de préférence utiliser des déchets non utilisables en bois d'œuvre ou en papeterie-cartonnerie-cellulose, ces affectations assurant un stockage du carbone pendant une plus longue durée.

Un des modes de combustion qui pourrait se développer est la co-combustion de bois et de charbon dans des chaudières de centrales thermiques adaptées à cet effet, réduisant le taux d'émission de CO₂ de ces nouvelles centrales.

4.3.2 La méthanisation, le biogaz

Les unités de biogaz peuvent fonctionner à partir des décharges, des stations d'épuration, du lisier, des déchets agricoles... Il en existe environ 4 000 en Europe, qui produisant environ 3 Mtep.

Le potentiel de développement est élevé car cette source d'énergie est en même temps une manière de traiter les déchets organiques des décharges, qui correspond à une forte demande. Une forte ambition européenne prévoit d'atteindre 15 Mtep en 2010 (soit ~ 1/100 de la consommation annuelle d'énergie). Le Royaume Uni est en tête avec 0,9 Mtep (Allemagne 0,5 Mtep, France 0,2 Mtep). Les décharges et les stations d'épuration constituent un potentiel important de développement (en France 3,5 Mtep).

L'objectif d'injecter le biogaz dans le réseau de gaz naturel ne pourra être atteint que si le biogaz est épuré (composition fluctuante et risque corrosion).

4.3.3 Les biocarburants

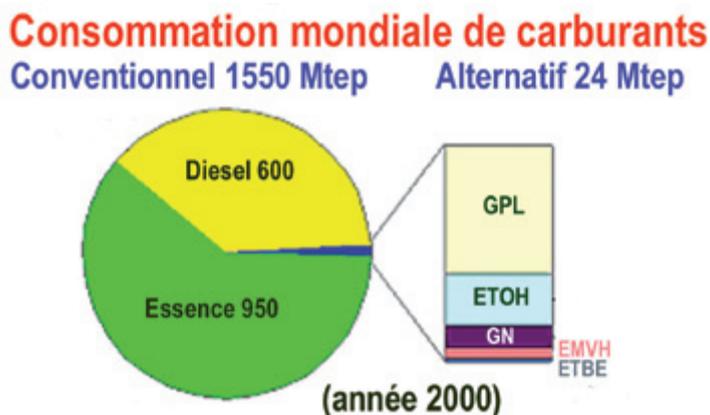
Pourquoi cette relance des biocarburants, car c'est bien une relance ? On a fait des biocarburants depuis longtemps lorsque l'approvisionnement en pétrole n'était pas aussi bien assuré qu'actuellement, ou interrompu pendant la guerre, mais ils avaient disparu du marché après la guerre lorsque le pétrole fut abondamment distribué et de prix de plus en plus bas, la production de biocarburants étant alors plus coûteuse que l'achat de pétrole, et aussi très insuffisante pour faire face aux besoins croissants de carburant.

Quatre motivations sont à l'origine de cette relance, dont trois semblent pérennes :

- La hausse structurelle et de long terme des cours du pétrole qui réduit progressivement son avantage économique.
- La révélation et l'accélération du réchauffement climatique lié aux émissions de CO₂ dues à la combustion du carbone fossile, notamment des hydrocarbures, qui favorise une filière biocarburants *a priori* moins émettrice.
- La recherche d'une réduction de dépendance vis-à-vis des hydrocarbure importés de pays porteurs de risques géopolitiques, même si cette réduction est modeste.
- Un soutien au monde agricole, handicapé depuis plusieurs décennies par des excédents de production entraînant des mises en jachères de 5 à 6 millions d'hectares en France, par une orientation vers des produits non alimentaires. Cette dernière motivation est pratiquement en voie de disparition depuis le récent accroissement de la demande mondiale et la montée des cours des produits alimentaires agricoles.

Les biocarburants ne représentaient en 2000 que moins de 1 % de la consommation mondiale de carburants (figure 21). En France en 2007, ce taux a atteint 1,75 %. Ce pourcentage est en augmentation partout, certains pays comme le Brésil disposant de grandes surfaces et de conditions climatiques et salariales privilégiées à partir de la canne à sucre sont largement en tête (36% de la production mondiale).

Figure 21
(source André Douaud)



Une directive de 2005 fixe pour l'Union européenne un objectif de 5,75% en 2010 qui semble difficile à atteindre sans importation pour la plupart des pays de l'Union, les exemples de l'Allemagne (3,3 Mtep en 2006) et de la France (0,8 Mtep en 2006) étant peu suivis. En France, à partir d'un niveau modeste, des objectifs plus ambitieux ont été fixés (5,75% en 2008, 7% en 2010, 10% en 2015). La production a effectivement fortement accéléré (triplé de 2005 à 2007, dont 70% sur le biogazole) et permettra probablement d'atteindre l'objectif 2010 avec 3,6 Mtep de biodiesel et 1,2 Mtep d'éthanol, par de grands investissements, une reprise de jachères modérée et une importation partielle économiquement inévitable compte tenu des écarts de coûts considérables entre les biocarburants européens et ceux ex Brésil ou ex USA.

Des défiscalisations variables selon les pays ont été mises en place pour favoriser l'atteinte de ces objectifs (en France 33c€/l d'éthanol et 25 c€/l d'EMHV en 2007), car ces biocarburants restent tous plus coûteux à produire que le pétrole à importer, cet écart se réduisant toutefois avec la montée du cours du pétrole sur le long terme et les progrès dans la production des biocarburants (mais on doit toutefois noter que le prix de la biomasse augmente aussi).

Les biocarburants se divisent de deux manières :

- **Dans le présent**, entre le **bioéthanol** (pour moteurs à essence), et le **biodiesel ou diester** (pour moteurs diesel). Ces deux biocarburants sont produits à partir de cultures agricoles sur sols enrichis (en Europe betterave, maïs, blé, colza, tournesol, au Brésil canne à sucre, aux Etats-Unis maïs). La motivation des agriculteurs en faveur de ces «agrocarburants» est forte mais la hausse récente des prix des céréales remet en question leur intérêt, le gain écologique de ces agrocarburants étant contestable, ainsi que la compétition à laquelle ils donnent lieu avec les cultures vivrières et l'accès à l'eau. Une clé de leur développement, aussi bien en Europe qu'aux Etats-Unis, reste un traitement fiscal permettant de compenser leur surcoût par rapport aux carburants fossiles.

- **Dans le temps**, entre les **biocarburants actuels**, dits de 'première génération', qui viennent d'être décrits, et les **biocarburants dits de 'deuxième génération'**, faisant appel comme source de matière première aux plantes complètes (non seulement les graines, mais les tiges, feuilles, pailles, bois, faits de matières ligno-cellulosiques). Ces filières en développement permettaient d'étendre la ressource (plus que doublée), et de limiter la concurrence de la ressource avec l'alimentation animale et humaine, tout en promettant des rendements en tep/h.

a. Filières actuelles

✗ L'éthanol/ETBE*, obtenu par **transformation alcoolique**. C'est mondialement la filière de loin la plus importante en volume (90%) car la diésélisation croissante du parc automobile ne touche que l'Europe, le reste du monde gardant la motorisation essence. La ressource est la canne à sucre au Brésil, le maïs aux Etats-Unis, la betterave, le maïs et le blé en France. L'éthanol est utilisé sous deux formes :

- Directement mélangé à l'essence (maintenant jusqu'à 85 %), se développe dans les pays aux normes moins astreignantes et gros consommateurs d'essence (Etats-Unis, Brésil), présente quelques problèmes d'utilisation liés à sa volatilité et à sa solubilité dans l'eau et suit difficilement la sévérisation des normes antipollution en Europe. Le moteur « flexfuel » a été développé pour s'accommoder d'un pourcentage variable d'éthanol. Ce mélange est limité en France à des flottes captives, le réseau de distribution étant encore insuffisant.
- Plus généralement sous forme d'ETBE (EthylTercioButylEther) à 47 % d'éthanol, qui a des propriétés physiques voisines de celles des essences, et lui est préféré en France où il est incorporé à 15% dans l'essence.

Les coûts de production du bioéthanol sont très variables selon les climats et les salaires de culture, variant de 25 c€/l ex-canne du Brésil, ~30-40 c€/l ex maïs des Etats-Unis, à ~50-60 c€/l en Europe.

✗ Le bio-diesel, obtenu par **estérification** des huiles végétales de colza, tournesol, palme, etc., incorporé à 5-7 % au gazole (limité par la nouvelle technologie des moteurs diesel), est en forte croissance depuis 10 ans en Europe où le moteur diesel est largement dominant et représente environ 2 % de la consommation de gazole en France.

Les coûts de production du biodiesel est de l'ordre 60 c€/l en Europe. Sa production y est limitée par les surfaces disponibles.

À noter qu'en Allemagne, une utilisation directe de l'huile végétale totalement détaxée est permise, et représente environ 20 % du biodiesel.

Le rendement énergétique en tep par hectare de ces agrocarburants est de l'ordre de 1,5 tep/ha pour les céréales, 3,4 t/ha pour la betterave, 4 tep/ha pour la canne à sucre.

Ces filières d'agrocarburants, fortement lancées et munies d'investissements conséquents, font récemment l'objet de critiques, non seulement de ne pas être très efficaces dans leurs capacités à limiter l'effet de serre (particulièrement pour l'éthanol) mais aussi d'accaparer des terres agricoles dont l'humanité aura grand besoin à l'avenir pour assurer sa subsistance. La nécessité de leur soutien est donc devenue discutable avec la montée des cours des produits agricoles alimentaires.

b. Filières en devenir (dites de 'seconde génération') >2020

Les nouvelles matières premières utilisées sont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, étroitement imbriquées en proportions variables dans la structure des végétaux. Leur formulation, voisine de $C_{12}H_{22}O_{11}/C_6H_9O_4$, avec un peu moins de 50 % de carbone, leur donne un pouvoir calorifique d'environ 0,4 tep/t biomasse sèche.

À partir de ces ressources ligno-cellulosiques, on peut produire de l'éthanol par voie enzymatique, mais l'intérêt se porte plutôt en Europe vers la production de biocarburant gazole.

✖ **La voie enzymatique** vise à extraire des deux premiers composants des sucres fermentescibles (sucres en C_6 seulement actuellement, qui ne représentent que 30 à 40% de la biomasse sèche) pour en extraire ensuite de l'éthanol. La lignine étant utilisée comme combustible générateur de chaleur dans les réactions.

L'avenir de cette filière est entre les mains des créateurs de nouveaux cocktails d'enzymes permettant ces transformations, notamment l'obtention de sucres en C_5 à partir des hémicelluloses et la 'fermentabilité' de ces sucres. Plusieurs installations pilotes sont lancées et expérimentent le procédé sur les pailles de blé, les rafles de maïs, la bagasse de canne et les plaquettes de bois.

Les productions en tep/ha semblent devoir être du même ordre de grandeur que pour l'éthanol de première génération.

✖ **Les voies thermochimiques :**

– Après un prétraitement de dissémination-broyage de la biomasse, une **pyrolyse rapide** vers 500/600°C dans des petites unités voisines des lieux de collecte de la biomasse produit une « huile de pyrolyse », base liquide intermédiaire plus aisément transportable vers une grande raffinerie où elle est transformée en biocarburant. Une autre voie de production de base liquide, encore à l'état de recherche, est une **conversion hydrothermale directe** convertissant la biomasse humide à 300/350°C.

– **Gazéification** : la combustion partielle en présence de vapeur d'eau à haute température produit un gaz de synthèse $CO-CO_2-H_2$, la chaleur étant fournie par la combustion d'une partie de la biomasse (procédé autothermique). Une combustion à l'oxygène présenterait plusieurs

intérêts, mais la séparation de l'oxygène de l'air est coûteuse. À partir de ce gaz, le procédé Fischer-Tropsch (déjà utilisé pour le charbon et le gaz naturel) permet de synthétiser un biocarburant liquide (BTL) d'excellente qualité.

L'optimisation des conditions thermodynamiques et cinétiques des réactions conduit à rechercher de hautes températures (1 250-1 500°C), plutôt qu'une conversion catalytique en dessous de 1 000°C, afin de convertir le méthane et les goudrons, fondre les cendres et obtenir des gaz riches en CO et H₂. La réaction étant fortement endothermique, un apport extérieur d'énergie (allothermique) permet d'améliorer le rendement masse⁶ à environ 30% sans apport d'hydrogène, et même dépasser 45 % avec un apport externe d'hydrogène, en utilisant tout le carbone de la biomasse, alors que les réactions autothermiques n'autorisent qu'un rendement de l'ordre de 15 à 20%, plus de 1/3 du pouvoir calorifique de la biomasse étant consommé pour maintenir la température, et le carbone de la biomasse n'étant utilisé qu'à environ 25%.

Les estimations économiques sont encore imprécises pour ces développements en cours ; on parle de 130-170 \$/baril pour ces BTL, dont ~45 pour la biomasse, 20-30 pour les transports, 30-50 pour les prétraitements, 35-50 pour la gazéification-synthèse. Comme une part importante du coût tient à la difficulté d'exploiter et de transporter la biomasse, il est attrayant de maximiser la production de BTL pour une récolte de biomasse donnée par un apport de chaleur sans émission de CO₂ (procédé allothermique), et un ajout d'hydrogène. Ces filières performantes restent toutefois du domaine du futur, l'apport de chaleur propre, et éventuellement d'hydrogène à un coût acceptable exigeant la création d'un parc nucléaire spécifique important.

4.3.4 Ordre de grandeur du potentiel de la biomasse

Les évaluations du potentiel de la biomasse-énergie portent essentiellement sur le rendement énergétique du cycle de vie et sur le lien énergie-eau-occupation du territoire. Des cultures irriguées avec engrais et une forêt ont des impacts extrêmement différents sur le cycle de l'eau et sa qualité, et le bilan environnemental est complexe.

En France où la consommation de carburants est de l'ordre de 50 Mtep/an, en supposant une reprise de jachères maximum de 5 Mha, et compte tenu des rendements énergétiques des agro-carburants de première génération, on peut estimer la contribution possible de ces biocarburants à 4-5 Mtep/an.

Au plan mondial, l'ordre de grandeur de 1,5 tep/ha ne permet pas à la biomasse de jouer un rôle de premier plan dans la production d'énergie ; le remplacement du seul pétrole (3,5 Gtep/an) exigerait plus de 2 milliards d'hectares de terres arables. La planète entière n'en comporte que 1,5 milliards, à partager avec la biomasse alimentaire.

6. Masse de gazole produite/masse de biomasse sèche traitée.

En France, ce rôle pourrait toutefois être amplifié par l'utilisation de la ressource ligno-cellulosique, plus abondante et dont le rendement de production de biocarburant pourrait être accru par un apport externe d'énergie dans le cycle de traitement thermo-chimique, voire par un apport d'hydrogène (lui-même demandeur d'énergie pour sa production) :

- par gazéification autothermique 1,2 à 1,5 tep/ha, 40 à 80 Mt, ~6 à 7 Mtep ;
- par gazéification allothermique +H₂ 2,5 à 3,5 tep/ha, 40 à 80 Mt, ~15 Mtep.

En atteignant par ces moyens des rendements de l'ordre de 3 tep/ha, on pourrait espérer produire en France 15 Mtep de biocarburant, soit 30 % de la consommation actuelle de carburants pétroliers. C'est donc une contribution non négligeable que les biocarburants pourraient apporter en les associant à l'énergie électrique, dont la consommation serait considérablement accrue par le développement de ce nouveau domaine.

Une autre incertitude sur le potentiel de la biomasse comme source de biocarburants de première génération est sa compétition avec les produits alimentaires dont les cours qui avaient chutés d'un facteur 2,4 depuis les années 60 sont extrêmement fluctuants suivant les conditions climatiques de l'année. Le blé a triplé son cours en moins d'un an en 2006 suite à une sécheresse en Australie tandis qu'au Brésil l'intérêt de l'éthanol dépend du cours mondial du sucre) mais les cours semblent devoir remonter sur le long terme.

Une compétition s'établira entre biocarburants, pétrole, électricité, bioénergie de chauffage et productions alimentaires. Cette compétition sera gouvernée par l'évolution des prix de chacun de ces secteurs. Compte tenu de la croissance continue de la consommation énergétique du secteur transport et des moyens très diversifiés de satisfaire les besoins d'énergie des autres secteurs, il est probable que les biocarburants garderont une valeur marchande bien supérieure à celle de la bioénergie.

4.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire parvenant à la Terre est très abondante, mais très diluée et intermittente, sa disponibilité au niveau du sol est limitée par l'alternance jour-nuit, la latitude et la nébulosité. Son utilisation requiert donc de grandes surfaces.

Lorsqu'elle est utilisée sous forme électrique, la continuité de service exigée par cette forme d'énergie doit être assurée par des moyens de stockage de chaleur ou d'énergie électrique, la connexion à un réseau de distribution pouvant jouer ce rôle de stockage électrique lorsqu'il s'agit des petites puissances photovoltaïques utilisées dans l'habitat.

L'énergie solaire reçue sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 2 500 kWh par an dans les déserts ensoleillés et de 800 kWh par an en Europe du Nord :

✗ L'utilisation de cette énergie en chaleur (chauffe-eau) se fait avec un rendement moyen annuel de l'ordre de 25%, soit 200 à 625 kWh/m². an.

✗ L'utilisation sous forme électrique (photovoltaïque) a un rendement moyen annuel de l'ordre de 10 %, délivrant 80 à 250 kWh/m².an.

On trouve les grandes surfaces nécessaires à la production d'énergie solaire, soit dans des zones semi-désertiques s'il s'agit de centrales solaires de dizaines ou centaines de MW, soit sur les toits ou les murs des bâtiments pour les usages domestiques de quelques kilowatts, comme chauffe-eau, appoint de chauffage, ou source d'électricité spécifique appuyée généralement sur le réseau.

Les trois voies principales d'utilisation sont :

– **Solaire thermique** pour l'eau chaude sanitaire domestique, une fraction du chauffage, la climatisation des habitations.

– **Solaire thermodynamique** par concentration du rayonnement sur une chaudière dont le fluide caloporteur alimente une turbine ou une machine Stirling à pistons entraînant un générateur électrique.

– **Solaire photovoltaïque**, développé dans deux types de configurations :

- Des installations isolées ne pouvant pas être reliées économiquement au réseau, alimentant des équipements professionnels (télécommunications, signalisation, balisage), ou destinés à l'électrification rurale dans les PVD et les îles. Elles doivent disposer d'un stockage d'électricité par batteries pour les périodes sans soleil, renchérissant le coût et nécessitant de l'entretien. Ces installations étaient majoritaires au début du développement du solaire.
- Dans les pays développés, des panneaux solaires connectés au réseau assurant une production décentralisée d'électricité domestique consommée sur place ou délivrée sur le réseau à un tarif encourageant cette filière, qui est maintenant devenue très largement majoritaire (~90%; et même 100% en Allemagne).

4.4.1 Le solaire thermique

La filière eau chaude sanitaire est en rapide développement, le prix du kWh varie de 3 à 12 c€/kWhth (thermique) si très ensoleillé, sinon 8 à 25 c€/kWhth. Le capteur solaire apporte 50 à 70 % des besoins d'un logement en Europe et 85 à 100 % en zones subtropicales (on note pourtant un développement plus lent dans ces régions où les besoins d'eau chaude et les moyens financiers sont plus faibles).

La filière chauffage de l'habitat, généralement par plancher chauffant, se développe plus difficilement, car elle ne peut s'implanter que dans les bâtiments neufs, et son caractère intermittent exige un chauffage d'appoint qui en augmente le coût, l'hiver n'étant pas la période de meilleur ensoleillement. Dans les régions septentrionales, le chauffage solaire permet de couvrir 20 à 40% des besoins selon les régions, essentiellement en mi-saison. Un stockage intersaisonnier n'est guère envisageable et seulement pour de l'habitat collectif.

Pour ces différentes raisons, la filière solaire thermique dans l'habitat ne représente encore qu'environ 2/1 000 de la consommation mondiale d'énergie. Elle était de l'ordre de 600 GWh en 2005.

Des solutions techniques ont été développées, notamment au Japon, pour assurer la climatisation demandée en été, leur commercialisation reste encore confidentielle vis-à-vis du marché des climatiseurs électriques. Ce type d'application demande une température plus élevée favorisant la famille des capteurs cylindriques sous vide.

Tous ces composants solaires actifs se greffent de plus en plus sur des architectures d'habitats solaires passifs (bioclimatiques) qui se développent pour des constructions neuves (disposition et choix des vitrages, superisolation, ventilation contrôlée).

Cette énergie solaire domestique thermique vient en remplacement partiel de moyens de chauffage fioul, gaz ou électrique ; elle réduit donc la consommation d'énergies fossiles et les émissions de CO₂, ce qui est la justification des subventions dont elle bénéficie (à noter que dans le cas de la France où l'électricité est très peu émettrice de CO₂, le remplacement de chauffe-eau électrique par un chauffe-eau solaire présente moins d'intérêt écologique).

En France, la loi de programmation sur les orientations de la politique énergétique de 2005 fixait un objectif de 1 million de m² par an de panneaux solaires thermiques en 2010, objectif qui ne sera probablement pas atteint (ff300 000 m² en 2007).

4.4.2 Le solaire thermodynamique

Plusieurs centrales solaires construites dans le monde depuis 25 ans, principalement en Californie, fournissent de l'électricité avec des puissances de 1 à 100 MW, avec des projets actuels de l'ordre de 500 MW (désert de Mojave aux Etats-Unis). Elles utilisent toutes des concentrateurs de flux solaire par des arrangements de miroirs répartis sur une grande surface. Plusieurs dispositions sont en concurrence selon la forme des concentrateurs, leur orientabilité et le mode de récupération de l'énergie thermique du flux solaire concentré :

- Avec plusieurs dizaines de milliers de **concentrateurs paraboliques** au foyer de chacun desquels est placé un récepteur de chaleur utilisant un cycle thermodynamique Stirling à pistons. Ce système permet d'atteindre des taux de concentration de 200 à 3 000, des températures de 300 à 1 000°C, et des rendements de 17 à 30%, pour un coût du kWhé de l'ordre de 30 à 40c€.

- Avec **concentrateurs cylindro-paraboliques** plus simples et un seul axe de rotation des miroirs, atteignant des taux de concentration plus faibles, de 20 à 80, et des températures moins élevées, de l'ordre de 400°C sur le fluide caloporteur d'un cycle thermodynamique classique. Le rendement n'est que de 14 à 16%, mais le coût est moins élevé, de l'ordre de 15 c€/kWhé. Le projet californien de 550 Mwé est de ce type, avec un champ de miroirs d'environ 25 km².
- Pour des puissances plus modestes, de l'ordre de 20 MW, les **centrales à tour**, où les miroirs asservis à la position du soleil permettent un taux de concentration de 300 à 800, des températures de 500 à 1 000°C, des rendements de 20 à 30% et un coût de l'ordre de 14 à 18 c€/kWé. Une dizaine de prototypes de puissances comprises entre 0,5 et 10 MW ont été construits aux Etats-Unis, en Espagne, en Italie et en France. Des projets de ce type dans la gamme des 10 MW sont en cours en Espagne.

Dans certaines solutions, un stockage du fluide caloporteur permet de limiter l'effet d'intermittence de l'énergie solaire.

Il est espéré que le coût du kWh produit par ces centrales, déjà parmi les moins coûteux en énergie solaire électrique, pourrait descendre vers 5 à 8 c€ vers 2020, comparable alors au coût de l'éolien. L'utilisation de la concentration en limite l'usage aux régions à ciel clair soit entre 15 et 40° de latitude. C'est pourquoi ce sont surtout les pays ayant un marché domestique à ces latitudes qui envisagent un développement industriel : Etats-Unis, Espagne et Japon, Allemagne comme tremplin à l'exportation vers les pays émergents.

4.4.3 Le solaire photovoltaïque

Les perspectives d'évolution du solaire photovoltaïque (PV) sont importantes :

- **Basé essentiellement sur la technologie du silicium**, soit monocristallin (32% du marché), soit polycristallin (58% du marché). Les rendements sont de 13 à 18%. Certains arrangements complexes et plus coûteux permettent de dépasser 20%.

Le silicium entre pour la moitié du coût dans le coût des cellules, et la moitié du silicium est perdue au sciage des tranches (wafers) de 0,2 à 0,3 mm d'épaisseur.

- Une deuxième génération longtemps attendue commence à voir le jour : les « **couches minces** » (de l'ordre du micron), déposées sur un substrat bon marché (verre, plastique). Le dépôt peut être du silicium amorphe, ou bien du tellure de cadmium (CdTe). Les rendements sont plus bas, de l'ordre de 6 à 12%.

Les deux axes de recherche sont l'accroissement du rendement vers 30 à 40%, et la réduction du coût vers 1 c€/Watt crête. Des valeurs de rendement dépassant 40% ont été atteintes par conversion multispectrale et par concentration optique, mais au prix de coûts sensiblement plus élevés. Des ruptures technologiques sont possibles vers les matériaux organiques et les nanomatériaux.

Le solaire photovoltaïque ne représente encore que quelques pour mille de la production électrique mondiale des énergies renouvelables, mais déjà 1,5 à 2% au Japon et en Allemagne. La raison en est son coût encore élevé. Sa production mondiale de l'ordre de 4 000 GWh en 2005 était toutefois supérieure à celle du solaire thermique et son expansion est très rapide avec un taux de croissance d'environ 30% par an (44% en Asie Est et Sud Est, 35% en Europe, 7% aux Etats-Unis). Le coût de la partie cellule (de l'ordre de 3 à 6 c€/W) pourrait tomber vers 1 à 2 c€/W en 2020. Le Japon couvre 46 % de la production, les Etats-Unis 26 %, l'Europe 20 %, la Chine s'introduit sur le marché.

Une installation se présente sous deux formes : connectée au réseau ou autonome :

– **Installation connectée au réseau**, (plus de 90% du marché actuel). Présente un très fort taux de croissance (30 à 35% par an), les installations utilisent les surfaces disponibles de l'habitat (toits, façades, appentis). Le prix actuel est de l'ordre de 5 à 10 c€/W, soit un prix du kWh de 0,2 à 0,4€, qui pourrait tomber à 0,15 à 0,30 € vers 2020. Ce prix est, certes, 5 à 10 fois le coût de production de l'électricité le moins élevé actuellement en sortie de centrale, mais il doit plutôt se comparer au prix payé par le consommateur sur le réseau de distribution où les ordres de grandeurs sont plus voisins. À noter également que l'investissement dans les composants solaires actifs du bâtiment peut induire des économies dans sa construction.

En cas d'un très fort développement de ces composants solaires actifs, leur impact sur la gestion des réseaux de distribution est encore mal connu (voir paragraphe 4.4.5.

Les politiques publiques de plusieurs pays (France, Allemagne, Espagne, Italie, Japon) soutiennent fortement le développement de l'énergie solaire photovoltaïque notamment pour les systèmes connectés, par la mise en place d'aides financières importantes (tarifs d'achat garantis, crédits d'impôts, etc.).

– **Système autonome**, (maintenant réduit à 5 à 10% du marché). Le prix actuel est de 8 à 40€/Wc selon la quantité et les lieux d'installation, soit un prix du kWh de l'ordre de 1,5€ dont les batteries représentent la moitié sur 20 ans, pourrait tomber à 1€ vers 2020, coût moins élevé que celui de l'électricité produite par un groupe électrogène de quelques kilowatts dans un site isolé avec les cours atteints par le pétrole à partir de 2007 et les transports locaux.

Toutes les voies d'utilisation de l'énergie solaire sont en forte croissance, stimulées depuis 2000 au Japon et en Allemagne par de grands programmes nationaux supportant la recherche, en France par le rachat obligé par EDF du kWhé solaire au tarif de 30 à 55 c€ selon le degré d'intégration au bâti, par des aides substantielles nationales et régionales à l'investissement et des avantages fiscaux.

Le résultat est la création d'un marché suffisant pour le développement d'industries de capacité de ~1 GWc/an, succédant aux start-up artisanales de quelques dizaines de MWc/an de la fin du vingtième siècle.

En France, les objectifs ambitieux du plan pluriannuel d'investissement, de 160 MWh photovoltaïques en 2010 et de 500 MWh en 2015 risquent toutefois de ne pas être atteints (36 MWh en 2006).

4.4.4 Quelques autres voies expérimentales :

- La cheminée solaire, avec un projet en Australie, utilise un champ de miroirs concentrant l'énergie pour chauffer de l'air ascendant dans une gigantesque cheminée (~1 000m) où il entraîne une turbine à air et alternateur générant de l'électricité.
- Un projet de production d'hydrogène par dissociation thermochimique de l'eau à partir d'un champ de miroirs concentrant l'énergie⁷ reste à mettre au point, les procédés chimiques complexes nécessitant en général un fonctionnement en continu.

4.5 L'énergie géothermique

L'énergie géothermique est une énergie nucléaire, provenant de la désintégration des éléments radioactifs à longue période de la croûte terrestre. Dans les parties stables du globe, la chaleur migre vers la surface par conduction (~ 0,06 W/m², gradient ~ 40°C/km), ce qui permet seulement une exploitation thermique (bassin parisien). Dans les zones actives, des fluides transfèrent l'énergie par convection (~ 1 W/m², gradient ~ 300°C/km) permettant une exploitation électrique et thermique.

Les zones volcaniques sont donc largement privilégiées (Philippines, Italie, Mexique, Indonésie, Japon, Nouvelle Zélande, Islande). À noter la volonté de l'Islande de développer un système énergétique totalement vert, essentiellement basé sur la géothermie et la production d'hydrogène par électrolyse haute température pour remplacer le pétrole dans les transports.

On exploite actuellement :

- ✗ des sites profonds dépassant 200°C qui permettent une **production d'électricité (~ 50 TWh = 0,4 % de la production mondiale)**. Coût 3 à 7 c€/kWh ;
- ✗ des sites moins chauds (~ 80 °C) dans des terrains sédimentaires, pour le **chauffage (40 TWh)** ;
- ✗ une autre forme d'énergie géothermique à très basse température utilise une pompe à chaleur pour relever le niveau enthalpique de la chaleur à basse température extraite du proche sous-sol. Ce système se développe en Suède, Allemagne, Autriche et pourrait contribuer pour 0,4 à 0,5 TWh vers 2010.

7. Déclaration de Carlo Rubbia en septembre 2003, à la Conférence européenne Hydrogène de Grenoble.

Le potentiel résiduel non exploité est important.

× **L'exploitation des roches chaudes sèches profondes ouvrirait des perspectives plus étendues** car de tels sites (d'environ 25 MW chacun) sont plus nombreux et présents en Europe. Aboutissement des développements vers 2020/2030 (prototype de Soultz-en-Forêt). Coût probable 5 à 9 c€/kWh ?

Un avantage de l'énergie géothermique par rapport aux énergies éolienne et solaire est d'être disponible à tout moment. Mais là encore les puissances envisagées en font une énergie qui semble devoir rester marginale au plan mondial, bien que précieuse pour les pays volcaniques.

4.6 Impact des sources d'énergie réparties sur un réseau de distribution

Les réseaux électriques traditionnels ont été conçus hiérarchiquement, la génération concentrée d'électricité dans de grosses centrales alimentant un réseau de transport haute tension, servant des réseaux de distribution moyenne tension aux industriels et des réseaux de distribution passifs basse tension aux consommateurs particuliers.

Si ces réseaux de distribution – ne comportant que des charges passives – doivent recevoir progressivement des composants actifs générateurs d'électricité **utilisant souvent des énergies renouvelables** (panneaux photovoltaïques, petits générateurs éoliens, piles à combustibles (PAC), etc.), les systèmes de gestion et de protection de ces réseaux devront être revus.

Les problèmes nouveaux apportés par l'introduction de ces mini ou micro générations, souvent intermittentes, sont de natures diverses selon qu'il s'agit de générateurs éoliens synchrones ou asynchrones, ou de générateurs photovoltaïques ou de piles à combustibles, reliés au réseau à travers un onduleur. On peut citer quelques-uns des points à analyser avant de développer largement l'introduction de ces types de génération sur les réseaux de distribution :

- La régulation de tension en régime stable, qui est perturbée par l'injection mal prévisible de puissance intermittente en certains points nodaux du réseau.
- La présence d'alternateurs éoliens (synchrones ou asynchrones) sur un réseau de distribution accroît le niveau des courants de court-circuit lorsqu'ils sont présents sur le réseau en cas de défaut, exigeant une complexification du système de protection par relais de surintensité du réseau, qui doit tenir compte de la présence ou non des sources intermittentes.
- Le fonctionnement des sources distribuées en îlotage par suite d'élimination d'un défaut sur le réseau et la reconnexion après élimination du défaut posent plusieurs problèmes : alimentation hors responsabilité réseau pendant les îlotages, avec risques d'accidents sur le personnel

d'intervention par la persistance de tensions sur certaines parties déconnectées du réseau, perte de coordination des systèmes de protection et de mise à la terre du réseau, reconnexion hors phase entraînant de forts courants transitoires. La pratique sera probablement d'interdire la marche en îlotage de ces sources distribuées pour éviter tous ces risques, ce qui exige de munir chaque source d'un système de protection anti-îlotage, plus ou moins complexe selon la nature des sources.

- Stabilités transitoires angulaire et de tension : en cas de court-circuit plus ou moins lointain sur le réseau : les petits générateurs synchrones éoliens, de faible inertie spécifique, accélèrent et peuvent perdre le synchronisme plus facilement que les grands alternateurs (stabilité angulaire). Les petits générateurs asynchrones éoliens, eux, accélèrent aussi pendant le court-circuit et présentent alors une réactance beaucoup plus faible absorbant un fort courant réactif pouvant entraîner une chute de tension conduisant à la perte du réseau (stabilité de tension). Ces considérations limitent la puissance injectable par des sources distribuées.
- Qualité de l'énergie délivrée : au-delà des problèmes d'intermittence, une contribution importante d'énergie électrique à travers des onduleurs (photovoltaïque et PAC) peut apporter des distorsions de forme d'onde par des harmoniques de tension, pouvant être nuisibles à certains systèmes alimentés par le réseau de distribution.

Annexe 5

L'énergie nucléaire

5.1 Les réacteurs éprouvés

Trois familles de réacteurs ont acquis une expérience d'exploitation significative :

✳ **Une très large expérience** pour les réacteurs à neutrons thermiques (essentiellement les réacteurs à eau de 1 000 MWé), brûlant U^{235} avec vocation à la production d'énergie. Ces réacteurs utilisent mal les ressources d'uranium naturel car ils ne brûlent qu'une partie des 0,7% de U^{235} contenu dans l'uranium naturel après enrichissement (sauf la filière canadienne CANDU). Ils produisent du plutonium civil (Pu) et des déchets, produits de fission et actinides mineurs (américium, curium, neptunium). Le parc mondial de ces réacteurs commerciaux (réacteurs expérimentaux exclus) est d'environ 440, dont plus de 400 de génération II, à modérateur eau parmi lesquels une large majorité de réacteurs à eau pressurisée REP. La plupart de ces réacteurs de Génération II, prévus pour une exploitation pendant 30 ans, resteront en activité plus longtemps (40, voire 60 ans). Quelques réacteurs utilisant du combustible MOX (oxyde mixte d'uranium et de plutonium) brûlent Pu^{239} et Pu^{241} .

✳ **Une expérience beaucoup plus modeste pour :**

– **Les réacteurs à neutrons rapides (RNR) à sodium**, qui valorisent les ressources d'uranium naturel en brûlant U^{238} qui en constitue 99,3 %, ce que ne savent pas faire les réacteurs à neutrons thermiques. **La réserve de combustible nucléaire pour de tels réacteurs se compte alors en milliers d'années.**

– **Les réacteurs à neutrons thermiques à haute température, refroidis à l'hélium (HTR 8 à 900°C)**, de puissances plus modestes (100 à 300 MWé), pouvant brûler du plutonium accumulé. Certaines versions à très haute température (VHTR) pourraient produire de l'hydrogène par dissociation thermochimique de l'eau.

D'autres familles sont à un stade beaucoup moins avancé ; on peut les qualifier de concepts : ce sont les RNR à gaz, les RNR hybrides assistés par accélérateur de particules, les réacteurs à neutrons thermiques à sels fondus qui pourraient utiliser du thorium (Th^{232}) comme combustible. On les classe en Génération IV.

5.2 Évolution des trois familles de réacteurs éprouvés

On distingue les réacteurs à eau modernes, accessibles aujourd'hui, et les RNR à métal liquide et HTR, accessibles demain, réacteurs parfois appelés Génération III ou III+.

5.2.1 Les réacteurs à eau modernes (Génération III), tels que les projets américains, japonais, coréens, canadiens et franco-allemands (EPR et ESWR).

□ Le réacteur européen EPR 1 600 MW

C'est le prolongement des réacteurs REP actuels dont il bénéficie de la large expérience, il innove sur quelques points essentiels, sans introduire d'incertitudes techniques ou économiques majeures :

✓ Sécurité accrue :

- ◇ une fusion accidentelle du cœur devient un accident sans conséquence durable extérieure au site ;
- ◇ une résistance renforcée de l'enceinte de confinement vis-à-vis d'impacts d'avion ;
- ◇ une résistance aux séismes encore accrue (les réacteurs REP étaient déjà conçus pour une intensité sismique double de celle historiquement observée en leur lieu d'implantation).

✓ Efficacité augmentée :

- ◇ meilleure utilisation du combustible UO₂ ou MOX (70 GWj/t) ;
- ◇ coût du kWh : 3 à 4 c€, selon les conditions financières¹ (incluant les améliorations sur la sûreté) ;
- ◇ durée de vie 60 ans.

✓ Déchets réduits :

- ◇ il peut fonctionner avec 50% de MOX, au lieu de 30%, ce qui réduit les déchets à vie longue de 15 %.

5.2.2 Les RNR et HTR

□ Les RNR

Leur intérêt majeur est de mieux utiliser la ressource en uranium naturel. Un autre intérêt est de brûler tous les isotopes du plutonium et certains actinides mineurs.

En outre :

- ◇ ils ouvrent donc la perspective d'une utilisation durable de l'énergie nucléaire en augmentant la réserve de combustible nucléaire ;
- ◇ en France, la démonstration de faisabilité a été faite à Phénix et Superphénix ;
- ◇ ils concourent à la réduction de la quantité de plutonium issu des réacteurs actuels par le besoin qu'ils ont de disposer initialement d'une charge d'environ 10 tonnes de plutonium par GWé installé pour ensuite s'auto-alimenter ;

1. Notamment le taux de retour sur investissement.

- ◇ ils ne sont toutefois pas nécessaires aujourd'hui vu l'abondance et le faible prix de l'uranium, mais leur réapparition, avec une technologie mise à jour, semble inévitable dans l'hypothèse d'un développement général du nucléaire dans la seconde moitié de ce siècle.

□ Les HTR

Ces réacteurs à haute température peuvent brûler le plutonium civil et militaire. Leur puissance plus faible (100 à 300 MWé) pourrait constituer un avantage économique par le moindre investissement initial, dans une économie de marché qui pénalise les investissements à long temps de retour. Ces puissances plus réduites permettraient de viser le marché des puissances moyennes. Deux projets actifs sont en cours, différant essentiellement par la forme du combustible :

- ※ PBMR 110 MWé (RSA ESKOM, UK BNFL) ;
- ※ GT-MHR 285 Mwe (USA General Atomics, Russie, Framatome).

Le combustible, fortement enrichi en plutonium, est fait de particules enrobées de plusieurs couches dont une de carbure de silicium, tolère une température de 1 600°C, ce qui rend impossible la fusion du cœur, et constitue la première barrière de confinement.

Le refroidissement est assuré par de l'hélium comprimé entraînant une turbine à gaz. La cuve à hélium constitue la seconde barrière, la troisième étant le bâtiment lui-même. La puissance résiduelle en cas d'incident est évacuée passivement par convection.

5.2.3 Le coût du kWh nucléaire avec les filières assises sur l'expérience

- ※ REP de 1 à 1,6 GW : coût total 3 à 4 c€/kWh (y compris tous les coûts externes, dont la gestion des déchets, chiffre DGEMP conforté par l'étude finlandaise récente²). La part du combustible uranium dans ce coût est très faible, de l'ordre de 0,6 c€/kWh (le cours de l'uranium avait chuté de moitié entre les années 80 et le début des années 2000, mais vient de remonter rapidement par suite de l'accroissement récent de la demande, sans toutefois handicaper sérieusement la compétitivité du nucléaire ; la production de l'uranium ne pose aucun problème géopolitique, les sources étant bien réparties sur la planète. Actuellement seules les mines de plus haute teneur sont exploitées, et la recherche minière avait été stoppée pendant 20 ans lorsque les investissements nucléaires ont connu une pause ;

- ※ RNR de 1 à 1,5 GW environ 4 à 5 c€/kWh ;

- ※ HTR de 200 à 300 MW environ 4 à 5 c€/kWh.

À comparer au cycle combiné gaz : coût interne de 4 à 5 c€/kWh³ (+ coût externe CO₂ de 1 à 2,5 c€/kWh, soit un coût total de 5 à 7,5 c€/kWh).

2. les coûts de référence de la DGEMP, comme les coûts calculés par les économistes finlandais, le sont avec des taux d'actualisation de 5 et de 8 %, et aboutissent à des coûts de kWh compris entre 3 et 3,3 c€. Le coût de 4 c€ correspond à un taux de retour sur investissement compris entre 12 et 15 %, valeurs souvent citées par les financiers.

3. Avec un gaz à 5 \$/MBTU, soit 2 c€/kWh thermique.

5.3 Les systèmes nucléaires

On constate que chacune des filières nucléaires passées en revue a un objectif prioritaire, soit produire de l'énergie électrique au moindre coût, soit mieux valoriser les ressources d'uranium, soit contribuer à la diminution du stock de Pu. Chaque filière privilégie seulement un ou deux de ces objectifs. Une association de plusieurs de ces filières, nommée système nucléaire, est nécessaire pour satisfaire l'ensemble des objectifs, dans une proportion qui est fonction de la hiérarchie des objectifs retenus :

- ◇ production d'énergie électrique et/ou thermique ;
- ◇ valorisation des ressources naturelles ;
- ◇ destruction de plutonium et/ou d'actinides mineurs.

Quels pourraient être d'éventuels systèmes nucléaires futurs ?

On peut imaginer que les REP actuels, brûlant déjà une partie du Pu dans le MOX, seraient complétés à moyen terme par des EPR à sûreté et performances encore accrues, puis à plus long terme par des RNR pour mieux utiliser les ressources d'uranium et brûler le plutonium, éventuellement complétés ensuite par des réacteurs hybrides pour réduire les déchets d'actinides mineurs, selon l'état de développement de ces nouvelles filières.

Les HTR seraient utilisés dans l'hypothèse d'une limitation nécessaire des stocks de plutonium et/ou pour servir des marchés de puissance unitaire plus faible. Les VHTR pourraient ouvrir de nouveaux marchés dans le domaine des carburants de synthèse pour remplacer progressivement le pétrole.

5.4 Apparition des réacteurs de Génération IV

Les concepts Génération IV résultent d'un réexamen international de l'ensemble des technologies imaginables (et pour la plupart peu ou prou développées dans les années cinquante). Ils visent, à l'exception du VHTR, à intégrer dans une même filière la production d'électricité, la valorisation des ressources et une réduction significative des déchets à vie longue.

Six familles existent :

- ✗ **Les RNR à gaz** inspirés des HTR, mais à neutrons rapides ou intermédiaires. Le combustible très enrichi est complexe et l'exploitation plus délicate.
- ✗ **Les RNR à métaux liquides, en deux familles (sodium et plomb)** inspirés des expériences acquises, en essayant de simplifier les réacteurs, d'exclure un certain nombre de risques d'accidents et de faciliter l'inspection en service.
- ✗ **Les RNR à eau supercritique** qui tentent de bénéficier de l'expérience mondiale des réacteurs à eau, tout en jouant sur les caractéristiques particulières de l'eau supercritique

× **Les réacteurs à sels fondus** : à combustible liquide servant aussi de caloporteur, dont les produits de fission neutrophages sont extraits en continu, ce qui augmente le nombre de neutrons disponibles. Ces réacteurs, pour des raisons de physique et de sûreté, sont à neutrons thermiques ; de ce fait, ils sont particulièrement bien adaptés au cycle thorium/uranium²³³, la fission de l'uranium²³³ par des neutrons thermiques permettant d'envisager des systèmes surgénérateurs. En outre, l'inventaire en matière fissile est beaucoup plus faible que dans les RNR à cycle uranium/plutonium, ce qui faciliterait un taux de croissance du nucléaire beaucoup plus rapide. Enfin, ils génèrent peu d'actinides mineurs à vie courte ou moyenne, ce qui réduit la charge thermique des déchets à stocker.

Mais ce système présente également des inconvénients dont certains ont conduit, il y a 40 ans, à son abandon :

- la filière thorium/uranium²³³ doit être amorcée par de l'uranium²³⁵ (lui-même accompagné d'uranium²³⁸) ou par du plutonium : la filière sera donc moins « propre » qu'il n'y paraît ;
- le traitement en ligne du combustible pour en extraire les produits de fission est complexe et coûteux ;
- les produits de fission piégés dans le graphite augmentent considérablement le volume de déchets à haute activité ;
- la radioactivité des actinides à très long terme est supérieure à celle des actinides du cycle U – Pu (mais dans un cas comme dans l'autre, la radioactivité des actinides susceptible de revenir en surface est faible) ;
- le confinement de la radioactivité, notamment du tritium, est délicat, du fait de la suppression de la première barrière.

Globalement, ce cycle thorium présente un attrait limité tant que des besoins massifs en matière **fertile** n'existent pas.

Les **VHTR**, réacteurs à gaz à très haute température, ont pour cible les procédés thermochimiques, notamment la production d'hydrogène.

À ces six concepts de réacteurs du Forum Génération IV, dont cinq sont des surgénérateurs, il convient d'ajouter les recherches sur les **systèmes hybrides** (Systèmes Pilotés par Accélérateur ou SPA⁴). Ce sont des réacteurs sous-critiques à neutrons rapides, ne fonctionnant qu'avec une source extérieure de neutrons de haute énergie injectés par un accélérateur. Leur avantage est de pouvoir brûler les actinides mineurs, ce que ne peuvent pas faire les réacteurs critiques, même lorsqu'ils sont à spectre rapide, limités qu'ils sont par la pénurie de neutrons et, surtout, par la très faible proportion de neutrons retardés essentiels pour assurer la stabilité des réacteurs critiques. Leur coût est inconnu, mais il serait nécessairement plus élevé que celui des RNR critiques. Une estimation le met à plus du double de celui des EPR.

4. Également désignés par leur acronyme américain ADS (Accelerator-Driven Systems).

La recherche française est particulièrement orientée sur deux filières à neutrons rapides : le RNR sodium et le RNR à gaz à haute température, et une filière à neutrons thermiques à très haute température (projet Antares).

Les technologies stratégiques concernent les procédés de recyclage du combustible, la constitution des combustibles avancés et les matériaux du cœur et de la chaudière exposés à un flux intense de neutrons rapides

On peut penser que les premiers réacteurs commerciaux de Génération IV entreront en service à partir de 2040.

On peut, certes, évoquer la **fusion nucléaire contrôlée**, qui, dans la filière par confinement magnétique, vient de subir une accélération avec la décision de construire ITER, mais pendant les première et seconde périodes, seuls des Tokamaks expérimentaux seront réalisés et essayés. Ce n'est qu'en fin de troisième période que l'on pourrait, si ces essais sont concluants, voir apparaître les premiers MWh significatifs sur les réseaux. On sera donc encore loin de l'exploitation industrielle courante, même en troisième période. Cette filière n'est donc prise en considération que dans l'Annexe 9 consacrée aux recherches sur l'énergie.

Seule une réussite inattendue dans les recherches sur le confinement inertiel pourrait accélérer l'arrivée de la fusion sous cette autre forme. Ce n'est que vers 2012 que l'on aura une perception plus claire de cette possibilité après les premières tentatives de fusion sur le LMJ (Laser MégaJoule).

5.5 La question du plutonium

Une question est fondamentale : le plutonium est-il un déchet ou une matière précieuse ?

- ✳ Dans une perspective d'abandon du nucléaire, c'est un déchet dont l'élimination entraîne un coût externe (de 100 à 700 M€/t Pu, selon les moyens d'élimination).
- ✳ Dans une perspective de développement du nucléaire durable, c'est, au contraire, une matière énergétique de tout premier ordre puisqu'il est le combustible de choix des RNR ; son coût n'est alors que de 0 à 15 M€/t Pu).

Dans un cas comme dans l'autre, il apparaît nécessaire de définir de façon précise le devenir de cet élément en intégrant tous les aspects (retraitement, transport, recyclage, déchets associés, stockages ultimes) dans un « plan plutonium ».

L'Annexe 6 donne plus de détails sur la gestion des déchets nucléaires et du plutonium.

◇ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans « Rapports et communications », Commission « énergie et changement climatique » le thème « Filières nucléaires d'aujourd'hui et de demain ».*

Annexe 6

Analyse des obstacles au nucléaire

Les difficultés d'acceptation sociale de l'énergie nucléaire étant fréquemment le résultat d'une insuffisance de connaissances sur ce domaine difficile d'accès pour les citoyens manquant de culture scientifique, on ne peut éviter de passer en revue les sujets de doute et d'apporter quelques réponses permettant de les délimiter, c'est l'objet de cette annexe un peu plus détaillée que les précédentes.

Le public a trois frayeurs :

- ◇ la crainte des radiations ;
- ◇ la crainte des accidents ;
- ◇ la crainte des déchets.

6.1 La crainte des radiations

◇ *Voir Annexe 0 pour les bases et le Glossaire pour les unités*

La radioactivité émise à l'extérieur par un réacteur nucléaire en fonctionnement normal est de l'ordre du **millième de la radioactivité naturelle**, et de l'ordre du dixième de celle d'une chaudière à charbon (la combustion du charbon libère en effet dans les cendres et les fumées les éléments radioactifs naturels qu'il contient : l'uranium et ses descendants, le thorium et ses descendants, et le potassium).

Une partie du public n'a pas suffisamment conscience que la radioactivité est un phénomène naturel (voir Annexe 0), que nous vivons dans une radioactivité ambiante où chacun(e) reçoit une dose de rayonnement ionisant annuelle variable avec le lieu, la nature des sols et l'altitude. En France, la moyenne est de 2,4 millisieverts par an, avec des variations de 1 à 10 suivant les régions. Au Kérala (Sud-Ouest de l'Inde), elle peut atteindre 100 mSv/an.

Cette radioactivité ambiante vient de plusieurs sources; sur la moyenne française de 2,4 mSv/an, on décompte :

- ◇ ~0,5 mSv venant du sol (rayonnement tellurique) ;
- ◇ ~0,4 mSv venant de l'espace (rayons cosmiques) ;
- ◇ ~1,4 mSv par respiration de radon (gaz radioactif résultant de la transformation du radium) ;

- ◇ ~0,4 mSv par la nourriture qui contient toujours des éléments radioactifs ;
- ◇ ~0,8 mSv par les examens médicaux ;
- ◇ ~0,02 mSv résidus des essais de bombes nucléaires dans l'air des premières années de la guerre froide ;
- ◇ ~0,01 mSv provenant de l'ensemble des industries et centrales nucléaires.

Les retombées en France de Tchernobyl 1986 ont représenté en 1986 de 0,025 à 0,04 mSv, décroissant en 1987 à 0,001 à 0,0015 mSv.

Toutes les doses précitées sont ce que l'on appelle des **faibles doses** (inférieures à 100/200 mSv/an). À l'autre extrémité de la plage, une dose de l'ordre de 10 000 mSv reçus en un temps court est rapidement létale ; entre les deux, des cancers de la thyroïde chez l'enfant peuvent commencer à apparaître au-dessus de 200 mSv).

Aucune étude, aussi fouillée soit-elle, n'a jamais mis en évidence un effet néfaste des faibles doses dues à la radioactivité, qu'elle soit naturelle ou artificielle.

Le public, dans sa grande majorité, n'en est pas persuadé et il y a là un obstacle majeur à l'acceptation de l'énergie nucléaire et des applications de la radioactivité dans les domaines du diagnostic et du traitement, qui peut même aller jusqu'à une attitude réservée vis-à-vis de la radioactivité naturelle dans laquelle nous baignons, qui est une radioactivité faible mais largement supérieure à celle rejetée par les centrales nucléaires et les usines de retraitement du combustible. Cette question est davantage développée dans l'Annexe 8.

6.2 La crainte des accidents et attentats

Les accidents majeurs n'ont pas eu d'effets sur la santé publique lorsqu'ils sont survenus sur des réacteurs occidentaux (fusion du cœur à Three Mile Island, Pennsylvanie, mars 1979). Le dramatique accident de Tchernobyl a affecté un réacteur russe RBMK, instable par conception, qui ne respectait pas les critères de sûreté occidentaux. Depuis cet accident, les principes de sûreté qui prévalaient en Occident sont maintenant acceptés mondialement, et des outils crédibles et universels d'évaluation de sûreté ont vu le jour. Le bilan de tous les autres réacteurs dans le monde est exemplaire depuis plus de 20 ans (30 ans en France sans aucun accident majeur).

6.2.1 Quels sont les principes de sûreté limitant les conséquences des accidents ?

Le principe de base est une défense en profondeur sur 3 postes-clés, basée sur plusieurs lignes de défense indépendantes sur chacun d'eux :

- contrôle de la réaction en chaîne, par plusieurs moyens indépendants d'arrêter cette réaction ;
- évacuation de l'énergie du cœur après arrêt, par plusieurs systèmes redondants et diversifiés

d'évacuation de puissance résiduelle ;

- confinement de la radioactivité, par plusieurs barrières entre produits radioactifs et environnement.

Ces concepts de défense en profondeur confèrent en même temps aux centrales nucléaires une résistance notable face aux risques d'attentats et en limiteraient les conséquences potentielles tant matérielles qu'environnementales.

Les risques d'attentat se prêtent, évidemment, mal à un débat public pour des raisons évidentes de discrétion sur les contre-mesures, ce qui ne permet pas de donner des indications précises sur les modes de protection. On peut, cependant, donner quelques indications générales : par exemple, une étude publiée dans la revue américaine « Science » explique pourquoi l'enceinte de confinement heurtée de plein fouet par un avion de ligne serait, certes, endommagée mais empêcherait que la chaudière nucléaire soit affectée.

Un rapport publié par « Wise » en 2002 a annoncé qu'un attentat du style « 11 septembre » sur La Hague ferait autant de dégâts que « 67 Tchernobyl ». Il est relativement aisé de montrer qu'une telle affirmation est absurde pour plusieurs raisons : impossibilité de provoquer une réaction en chaîne avec des combustibles usés, or, c'est elle qui a été à l'origine de la forte dispersion de produits de fission à Tchernobyl ; absence d'iode¹³¹, responsable des seuls cancers avérés à Tchernobyl ; et, argument le plus simple et le plus convaincant, la présence de milliers de m³ d'eau dans la « piscine » de refroidissement des combustibles usés alors que la combustion de 30 tonnes de kérosène que contiendrait l'avion suicide ne permettrait d'évaporer que 600 m³ d'eau. De fait, la principale arme des auteurs d'attentat est la peur de tout ce qui est radioactif et il est essentiel de tout mettre en œuvre pour que le public ait une plus juste appréciation de ces risques. Les exercices de crise peuvent y contribuer, mais un travail de fond est à effectuer dès l'école.

6.2.2 Les causes de l'accident de Tchernobyl

L'accident fut le résultat d'une accumulation de défauts de conception du réacteur qui ne respectait pas les principes de sûreté précédents, déjà utilisés en Occident à l'époque, et aussi de nombreuses fautes d'exploitation :

Défauts de conception :

- ◇ réacteur instable en dessous de 25% de sa puissance, avec tendance à l'emballement ;
- ◇ descente trop lente des barres de contrôle (20 s au lieu de 2 s sur les réacteurs REP) ;
- ◇ effet accélérateur de réaction des embouts de carbone sur les barres de contrôle ;
- ◇ modérateur graphite inflammable qui a causé l'incendie ;
- ◇ surtout, absence d'enceinte de confinement, ce qui a permis la dispersion de radioactivité.

Fautes d'exploitation liées à l'usage militaire du réacteur produisant du plutonium pour armes, mettant en évidence un manque de culture de sûreté chez les opérateurs :

- ◇ **6 fautes** : 3 mises hors-circuit volontaires des sécurités sur ordre, 2 violations de consigne, 1 non-respect de procédure d'essai. Une seule de ces erreurs évitée aurait évité l'explosion.

6.2.3 Les conséquences sanitaires de l'accident de Tchernobyl

Lors de la première édition de ce rapport, la source d'information la plus sérieuse était le rapport 136 de l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations) du 6 juin 2000, 14 ans après l'accident, faisant suite à des années d'enquête dans tous les pays concernés. Ses conclusions, complétées par les rapports successifs de l'IRSN, sont résumées ci-dessous :

- ※ 2 tués par l'explosion + 28 personnes décédées dans les deux mois par irradiation aiguë + 1 mort par arrêt cardiaque, soit 31 décès rapides auxquels il faut ajouter 8 décès ultérieurs attribués aux doses reçues ;
- ※ 1 800 cas de cancer thyroïdien chez les enfants entre 1986 et 2000, dont 10 mortels, qui auraient tous été évités par absorption rapide de pastilles d'iode comme cela se pratique dans les autres pays, auxquels il faut ajouter quelques cas chez de jeunes adolescents ;

Une mise à jour de cette évaluation des conséquences sanitaires de Tchernobyl a été réalisée en 2005 et 2006 par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et l'Agence Internationale de l'énergie atomique (AIEA), mandatées par l'ONU dans le cadre du « Forum Tchernobyl ».

De cette nouvelle évaluation, on peut extraire les données suivantes en ce qui concerne les décès attribuables à l'émission de radioactivité consécutive à l'accident, d'une part, les décès recensés à ces dates, d'autre part, la mortalité différée calculée par modèle :

- Parmi les 237 intervenants sur le site, irradiés lors de l'accident, aux 28 décédés par irradiation aiguë dans les deux premiers mois, déjà cités dans le rapport de juin 2000, s'ajoutent 19 décès recensés entre 1987 et 2004 attribuables à l'irradiation.
- Parmi la population proche dans les trois pays Ukraine, Biélorussie et Russie, 9 décès par cancer de la thyroïde entre 1986 et 2006 sur 4 000 cas identifiés.
- Aucun accroissement de mortalité par cancer solide ou leucémie n'a pu être attribué à la radioactivité, ni aucun excès d'anomalies congénitales par rapport aux statistiques de référence.
- Forte perturbation sociale chez les personnes déplacées, accroissement mal connu des suicides et des morts violentes entre 1986 et 2000, ainsi que de nombreuses affections non liées à l'action des rayonnements ionisants.
- Au-delà des zones proches fortement irradiées, les zones européennes touchées par le panache radioactif ne présentent aucun écart statistique sur les cancers de la thyroïde par rapport aux zones hors panache.
- L'évaluation des morts futurs souvent évoqués dans les médias : parmi la population proche, si on applique un modèle statistique linéaire sans seuil (le plus pessimiste, sans fondement scientifique, voir Annexe 0) pour estimer le nombre possible de victimes différées (non-identifiables), on peut parvenir au nombre de ~4 000 depuis 1986. Une projection de ce même mode de calcul jusqu'en 2065 peut conduire à ~16 000 décès cumulés. Ne pas oublier que ces victimes ne sont

pas des victimes réelles constatables, mais des victimes calculées par une méthode dont les bases scientifiques ne sont pas avérées.

On constate donc que même en faisant des hypothèses pessimistes sur le nombre de décès par irradiation pouvant survenir plus tardivement, il n'est pas possible d'atteindre les chiffres très exagérés qui ont été propagés dans les médias et souvent retenus par la mémoire collective (certains journalistes français ont cité le chiffre de 600 000 morts). Les conséquences de l'accident de Tchernobyl restent très en deçà de celles de beaucoup d'autres accidents industriels comme les milliers de morts annuels du charbon. Le charbon fait chaque année cent à mille fois plus de victimes que le nucléaire civil n'en a fait depuis le début de son existence.

6.3 La crainte des déchets

On doit d'abord noter les ordres de grandeur des volumes de déchets :

La production de 1 GW pendant 1 an laisse en déchets :

- ◇ pour une centrale à charbon : 350 000 m³ de cendres, 6 000 t de poussières, 8 Mt de CO₂ ;
- ◇ pour une centrale nucléaire : 120 m³ de déchets de faible activité à vie courte, 5 m³ de déchets de faible ou moyenne activité à vie longue, 2,5 m³ de déchets de moyenne et haute activité vitrifiés si on retraite (ou 40 m³ sans retraitement).

La gestion des déchets nucléaires semble donc a priori simplifiée par leur faible volume

Les principaux radionucléides contenus dans les déchets sont :

- ◇ les produits de fission, dont la grande majorité a pratiquement disparu au bout de 2 à 3 siècles ; seuls subsistent quelques radionucléides à vie très longue (I¹²⁹ et Cs¹³⁵ sont les plus notables) ;
- ◇ les actinides, produits par captures successives de neutrons dans l'uranium et le plutonium : les principaux sont le neptunium, le plutonium, l'américium et le curium ; diverses réactions nucléaires transforment certains de ces radionucléides (exemple Pu²⁴¹ > Am²⁴¹ > Np²³⁷). Le plutonium tient un rôle à part ; produit à partir de U²³⁸, il est fissile et permet de valoriser U²³⁸. Il est donc considéré parfois comme un déchet, parfois comme une ressource.

Par contre, la gestion des déchets est compliquée par le dégagement de chaleur associé à la radioactivité des produits de fission et de quelques actinides mineurs à vie courte et moyenne.

6.3.1 Principes de la gestion des déchets

La gestion des déchets repose sur l'étude de divers et nombreux scénarios pour des installations de stockages réalisées avec les meilleures techniques actuelles. Ces scénarios prennent en compte une évolution plus ou moins prévisibles et des situations altérées; la gestion repose sur plusieurs principes :

Un premier principe : le confinement des radionucléides

L'objectif ultime de la gestion des déchets radioactifs est d'empêcher la radioactivité de remonter jusqu'à l'homme en quantités entraînant des effets sur la santé (si l'on s'en tient aux normes actuelles, ceci signifie une dose à l'individu inférieure à 1 mSv/an).

Pour atteindre cet objectif, il y a un large consensus autour du principe de confinement des radionucléides. Les rares exceptions à ce principe concernent des radionucléides très peu radioactifs et qui peuvent se diluer dans la biosphère sans possibilité de reconcentration (I^{129} , Kr^{85} ...).

Ce confinement est assuré par des barrières successives ; dans le cas des déchets à vie longue enfouis, par exemple :

- une matrice robuste (oxyde d'uranium en absence de retraitement, verres dans le cas du retraitement) ;
- un conteneur résistant à la corrosion ;
- une barrière ouvragée destinée à la fois à limiter l'arrivée d'eau et à retenir les éventuelles fuites de radionucléides ;
- une couche géologique destinée à maintenir les déchets à l'abri d'événements extérieurs (glaciation, guerres) et à retenir les fuites de radionucléides.

Un deuxième principe : le tri

Les déchets radioactifs sont caractérisés par leurs volumes, leurs périodes et leurs activités (leur dégagement de chaleur étant une conséquence de ces caractéristiques). Il y a un large consensus sur l'intérêt de les trier et de réserver des sorts spécifiques à chaque composante de ce tri.

✓ Le premier niveau de tri, largement consensuel, sépare :

- les déchets à vie courte de faible et très faible activité (FA et TFA) – déchets A – plusieurs millions m³ pour le parc nucléaire français, déchets de démantèlement des centrales inclus), destinés à être stockés en surface (site de l'Aube), la radioactivité ayant totalement disparu au bout de 3 siècles ;
- les déchets de faible activité, mais comportant des émetteurs α à vie longue (déchets B – de l'ordre 100 000 m³; ces déchets ne dégagent pas de chaleur ;
- les déchets de forte radioactivité initiale (donc dégagant de la chaleur) et comportant des radionucléides à vie longue (déchets C – de l'ordre de 10 000 m³).

✓ Le deuxième niveau de tri n'est mis en œuvre que dans certains pays, dont la France. Il consiste à séparer le plutonium et l'uranium des autres radionucléides dans une opération dite de **retraitement** du combustible. Cette opération modifie à la fois les ressources en matières fissiles et la nature et les quantités des radionucléides présents dans les déchets (et notamment le dégagement de chaleur). On y reviendra plus loin.

- ✓ **Un troisième niveau de tri** a fait l'objet d'un certain nombre d'études : il consisterait à extraire un ou plusieurs des actinides mineurs (neptunium, américium, curium) en vue soit de leur assurer un confinement spécifique, soit de les transmuter en éléments à vie plus courte.

Les conséquences du dégagement de chaleur

Le dégagement de chaleur en début de vie des déchets C est très important et nécessite des dispositions appropriées de refroidissement : les combustibles usés sont entreposés pendant plusieurs années dans des piscines (à côté des réacteurs, puis à l'usine de retraitement). Les verres issus du retraitement, tout comme les combustibles usés non retraités, sont entreposés pendant plusieurs décennies avant d'être placés dans un stockage définitif ; au bout d'un temps plus ou moins long, leur refroidissement peut être assuré par des systèmes simples de convection naturelle.

Lorsque l'on veut placer les déchets C dans un stockage profond, il est généralement admis qu'il faut remplir deux conditions :

- Ne pas dépasser 100 °C sur la paroi externe du conteneur, afin d'éviter tout risque d'ébullition de l'eau si celle-ci trouvait son chemin jusque-là : cette condition fixe la quantité de radionucléides que l'on peut mettre par conteneur, en fonction de leurs natures et de leurs dégagements de chaleur.
- Ne pas dépasser un flux de chaleur par unité de surface du stockage (environ 10 kW/ha) compatible avec la bonne tenue du terrain dans le temps. Pour un terrain donné, cette condition fixe la superficie du stockage, qui sera d'autant plus faible que l'on aura réduit les sources de chaleur (soit en allongeant la durée d'entreposage, soit en poussant le tri encore plus loin et en transmutant certains radionucléides). Il en résulte que, malgré le faible volume des déchets C (10 000 m³), le volume à excaver pour leur stockage serait compris entre 5 et 25 millions m³ pour une emprise de stockage de l'ordre de 1 000 ha. Soit 10 fois plus que pour les déchets B pourtant 10 fois plus volumineux.

6.3.2 Le débat sur le retraitement des déchets nucléaires

Les pays qui ont choisi de ne pas retraiter le combustible usé (notamment les Etats-Unis), et de l'enfouir en totalité ont été guidés par le souci de limiter au maximum les risques de prolifération de matières nucléaires qui pourraient permettre d'alimenter des filières militaires ou terroristes. Cet argument s'est un peu affaibli au cours des années, et on peut parler sans passion des deux voies de séquestration des déchets (avec ou sans retraitement).

Le système nucléaire français a été créé avec une volonté d'indépendance énergétique dans un contexte de pénurie d'énergies fossiles. Il a été conçu avec une contrainte forte : la disponibilité et l'économie de matières premières fissiles. Le retraitement du combustible usé a été conçu pour extraire le plutonium qui devait être utilisé dans les réacteurs à neutrons rapides. Le retraitement

du combustible usé permet d'en extraire 99,8% du plutonium et de l'uranium. Après l'abandon de Superphénix, le plutonium est maintenant utilisé dans le combustible MOX, réduisant le volume des combustibles déchargés des réacteurs et entreposés. Ce retraitement conduit à ne pas enfouir le plutonium ou une grande quantité d'uranium ce qui est le cas lorsque les combustibles usés sont considérés comme des déchets ultimes.

En contrepartie, il faut gérer le plutonium, ce qui est et sera une affaire compliquée s'il n'est pas utilisé dans de nouveaux systèmes nucléaires (HTR, RNR,...).

Avantages et inconvénients du retraitement :

Le retraitement permet :

- de récupérer l'uranium²³⁵ restant et le plutonium produit dans le combustible usé, en vue de les recycler. Ceci augmente les ressources en matière fissile, de 20 % environ (10 % pour l'uranium +10 % pour le plutonium) si on les recycle une seule fois dans les REP, de 40 % (10 + 30) si on faisait du multi recyclage dans les REP, mais de 50 fois si on les recyclait dans des RNR ;
- de sortir le plutonium des déchets, ce qui réduit le dégagement de chaleur et l'inventaire de produits radioactifs α stockés.

Il a comme inconvénients :

- d'augmenter les quantités de déchets B en provenance de l'usine de retraitement ;
- d'augmenter, dans le combustible recyclé usé, les quantités d'américium (période 432 ans) et de curium (période 18 ans). Ces radionucléides, qui ont une vie plus courte que le plutonium, augmentent les sources de chaleur dans les déchets qui leur sont associés (combustible usé non retraité ou verres issus du retraitement) ; la présence de curium tend à augmenter les durées d'entreposage avant stockage, et celle d'américium compense partiellement la diminution des sources de chaleur liée à l'enlèvement du plutonium. Il faut noter que la production nette d'américium et de curium est plus faible dans des réacteurs à neutrons rapides, car une partie de l'américium produit y est détruite par fission.

6.3.3 Le débat sur la transmutation

Ce troisième niveau de tri n'est qu'hypothétique et fait l'objet d'études sur son intérêt :

Avantages et inconvénients de la transmutation des actinides mineurs

Les avantages et inconvénients doivent être regardés radionucléide par radionucléide :

- **pour le neptunium**, l'extraction est relativement facile, mais l'intérêt est très limité ; en effet, le neptunium a une période très longue (2 millions d'années) et est donc très faiblement radioactif ; il est peu soluble et peu mobile, ce qui réduit d'autant les possibilités de le voir atteindre la biosphère et l'homme. Tous les modèles de calcul donnent des effets potentiels sur l'homme très largement inférieurs à 1 mSv par an ;
- **pour l'américium**, l'extraction est plus difficile mais sa faisabilité a été prouvée ; la transmutation fait l'objet d'expériences dans le réacteur à neutrons rapides Phénix. L'intérêt serait de réduire

la source de chaleur dominante dans les verres après la décroissance des produits de fission, et donc de limiter l'emprise du stockage ; cet intérêt est en partie compensé par l'inconvénient que, parallèlement, on augmente les quantités de curium, ce qui conduirait à allonger la durée de l'entreposage des verres ;

- **pour le curium**, les opérations de transmutation sont très complexes du fait de la forte radioactivité de ce corps et l'intérêt est réduit car sa période est courte (15 ans) et il suffit d'attendre qu'il ait suffisamment déca.

En résumé, seule la transmutation de l'américium pourrait présenter un intérêt, et cela uniquement si la transmutation était réalisée dans un réacteur à neutrons rapides. Une telle voie s'inscrit normalement dans un scénario de développement des RNR, donc d'extension importante de la place du nucléaire dans le « mix » énergétique.

6.3.4 La gestion proche des déchets en France

Chaque année, 1 200 tonnes de combustibles usés sont déchargés des 58 réacteurs français. S'y trouvent mélangés avec l'uranium²³⁸ et l'uranium²³⁵ appauvri (et d'autres isotopes), 12 tonnes de plutonium, 1 tonne d'actinides mineurs et 50 tonnes de produits de fission.

- Ce combustible usé, après 4 ans de séjour dans le réacteur, est entreposé en piscine où il perd une grande partie de sa radioactivité en 6 à 8 ans. Une partie (850 tonnes) est ensuite retraitée pour séparer les matières recyclables (uranium et plutonium). Le plutonium récupéré est utilisé pour faire du MOX qui est envoyé aux centrales (utilisable dans 28 des réacteurs français mais seuls 20 sont 'Moxés'), ce qui réduit de 25% la quantité de plutonium produite et de 12% les besoins en isotope²³⁵ de l'uranium. En revanche, le recyclage du plutonium produit davantage d'actinides mineurs tels qu'américium et curium et cela complique la gestion ultérieure des MOX usés.

Les déchets ultimes (produits de fission (FP) et actinides mineurs) sont conditionnés sous forme vitrifiée et entreposés à La Hague en attente de leur orientation finale (prolongation de l'entreposage en entreposage réversible de longue durée ou stockage géologique). L'uranium appauvri, l'uranium de retraitement, l'UOX et le MOX usés sont entreposés en attente également de décisions concernant leur gestion. Ils constituent une réserve de matière fissile et fertile en cas de relance de la filière RNR.

6.3.5 La gestion à longue durée : problèmes spécifiques de chaque période de gestion

L'ensemble des éléments ci-dessus conduit à considérer 3 ou 4 périodes, selon les cas :

- ◇ une **première période de quelques décennies** pendant laquelle la radioactivité et le dégagement de chaleur sont dominés par les produits de fission. Le refroidissement des déchets est nécessaire. Il est assuré par l'entreposage (en piscine s'il s'agit de combustibles usés, en silos refroidis s'il s'agit de verres). On dispose aujourd'hui d'une large expérience industrielle ;

- ◇ une **deuxième période éventuelle**, lorsque les quantités de curium et de plutonium sont importantes (cas du combustible usé MOX non retraité ou des verres provenant du retraitement de combustibles très irradiés), **pouvant dépasser un siècle**, pendant laquelle on prolonge l'entreposage avec deux objectifs : 1° – attendre que le dégagement de chaleur ait suffisamment diminué pour permettre le stockage, et 2° – réserver la possibilité de récupérer le plutonium pour l'utiliser dans des RNR. Cet entreposage de longue durée ne soulève pas de problème technique nouveau, mais la pérennité de l'entreposage doit être assurée ;

- ◇ une **troisième période (quelques dizaines de milliers d'années)** où les déchets sont placés dans le stockage définitif, dont le dimensionnement est défini par les critères évoqués plus haut : les laboratoires souterrains et les travaux de qualification d'un site ont pour objet de fournir les éléments chiffrés de ce dimensionnement et les données nécessaires au dossier de sûreté. La radiotoxicité est essentiellement celle des actinides mineurs (et du plutonium s'il est incorporé en cas du non retraitement). Le confinement rapproché est assuré par les conteneurs ; la barrière géologique n'intervient qu'en cas de leur défaillance.

- ◇ une **quatrième période, au-delà de quelques dizaines de milliers d'années**, où seuls subsistent les radionucléides à vie très longue et, de ce fait, faiblement radioactifs. Les doses pour l'homme liées à des remontées éventuelles de radionucléides sont largement inférieures à la radioactivité naturelle pour les émetteurs α (neptunium) et pourraient s'en approcher pour ^{129}I si ce dernier n'était pas rejeté lors du retraitement (*NB- parmi les actinides mineurs, il reste essentiellement le Np^{237} , très peu mobile dans les conditions de stockage. On fait alors l'hypothèse que le confinement par conteneur peut être perdu, la barrière géologique assurant alors l'essentiel de la protection. En ce qui concerne les produits de fission à vie longue, au-delà de 100 000 ans, il ne subsiste que 5 PF importants : technétium⁹⁹, palladium¹⁰⁷, étain¹²⁶, iode¹²⁹ et césium¹³⁵. Les seuls PF réellement solubles dans l'eau sont le césium et l'iode et le seul vraiment mobile est l'iode – le césium est fixé par sorption dans le sous-sol – En prenant l'hypothèse la plus pessimiste d'un puits ouvert sur un site d'enfouissement contenant la totalité des déchets de 50 ans d'exploitation d'un parc de 400 TWhé/an, la dose reçue par la consommation exclusive de cette eau serait du même ordre de grandeur que celle délivrée la radioactivité naturelle moyenne en France de 2,4 mSv/an. De plus, on saurait réduire cette dose si on le souhaitait, en ajoutant de l'iode naturel dans les verres, ou en conditionnant l'iode des combustibles usés en céramique. Les modélisations associées aux différents scénarios montrent que les doses délivrées sur l'homme dans les hypothèses les plus pessimistes se chiffrent en fractions de celles dues à la radioactivité naturelle). Xxx Ordre/fraction... mystère ?*

6.3.6 En résumé

On a vu que les solutions mises en œuvre au cours des deux premières périodes bénéficient d'une large expérience industrielle et que le très long terme ne pose pas de vrai problème pour la

santé de l'homme. Seule la troisième période nécessite des études et des travaux pour confirmer les choix des natures des terrains pour le stockage définitif (argile, granite ou sel) et fournir les données nécessaires pour dimensionner le stockage et qualifier un site particulier. La mise au point des conteneurs adaptés aux déchets B et C ne pose pas de problèmes sortant de l'ingénierie classique. Les Finlandais et les Suédois sont bien avancés dans ce travail pour le stockage des combustibles usés dans des sites en granite. Le stockage des verres issus du retraitement devrait être plus facile.

Le problème des déchets nucléaires est-il pour autant un problème résolu ? Dans ses grands principes peut-être, mais dans la pratique pas encore. Comme on vient de le voir, il reste encore beaucoup de travail pour aboutir à la qualification d'un site de stockage et pour arrêter le dessin précis des conteneurs et les qualifier (pour une vie d'environ 25 000 ans). Il reste aussi à optimiser l'ensemble de l'aval du cycle : les solutions adaptées au parc nucléaire actuel, constitué de réacteurs à neutrons thermiques (en France, les REP), ne seraient pas nécessairement les meilleures pour un parc comportant des réacteurs à neutrons rapides, pour lequel il faudrait regarder de plus près l'intérêt d'extraire l'américium et de le transmuter. En réduisant les sources de chaleur dans les déchets, on augmenterait les capacités de stockage dans un site donné. L'ensemble de ces travaux est encadré par la loi Bataille de 1991 et suivi par la Commission nationale d'évaluation (CNE).

6.4 Les risques de prolifération

Le nucléaire civil est souvent associé, dans l'esprit du public, avec les armes nucléaires. De fait, il n'est pas techniquement impossible d'utiliser les matières fissiles du nucléaire civil pour fabriquer des armes nucléaires. Mais il est très difficile de le faire en cachette, et il existe d'autres moyens d'en fabriquer autrement plus faciles, notamment en enrichissant l'uranium naturel en uranium²³⁵ par centrifugation dans de petites installations fort discrètes.

Il est avéré que tous les détenteurs de l'arme nucléaire (8 pays : USA, Russie, France, Royaume Uni, Chine, Israël, Inde, Pakistan) l'ont construite avant d'avoir une industrie électronucléaire civile. Depuis 60 ans que l'arme nucléaire existe et 50 que le nucléaire civil existe, jamais une arme nucléaire n'a été réalisée à l'aide du nucléaire civil, où que ce soit dans le monde et cette situation a de bonnes raisons de perdurer. La vigilance s'impose toutefois dans les transferts de technologies nucléaires en ce qui concerne l'enrichissement de l'uranium, les types de réacteurs permettant un chargement et un déchargement fréquents, et le traitement des combustibles nucléaires usés.

6.5 Le coût

Le ministère de l'Industrie publie périodiquement les « coûts de référence » des différentes énergies, en ayant soin, pour le nucléaire, d'y incorporer les coûts « externes » ; l'OPECST a contrôlé dans un rapport public le bien fondé des hypothèses de ces coûts de référence, notamment les ordres de grandeur des provisions constituées pour financer le démantèlement des installations (0,14 c€/kWh) et le stockage des déchets (0,15 c€/kWh). Malgré cela, ces coûts restent contestés par une partie du public qui a du mal à comprendre les mécanismes financiers de ces provisions.

La question des assurances est également l'objet de contestations, certains ayant en tête les conséquences d'un accident tel que celui de Tchernobyl. En fait, les conséquences à l'extérieur du site d'un accident de fusion de cœur affectant un réacteur de type occidental ont été nulles à Three Mile Island, et seraient en tout état de cause largement plus faibles qu'à Tchernobyl ; il en résulte que le coût, pour l'essentiel, serait celui lié à la perte de l'installation et à son démantèlement, soit quelques milliards d'Euros. La probabilité d'un tel événement étant très faible, l'incidence en termes d'assurance serait faible.

Certains reprochent également au nucléaire de ne pas entrer dans ses coûts les dépenses de recherche auquel il a donné lieu. Cet argument est en partie vrai, mais en partie seulement. En effet, outre l'achat de la licence à Westinghouse, entièrement supporté par le prix du kWh, EDF et Framatome ont largement contribué au financement de la recherche et développement, financements également pris en compte dans le prix du kWh.

Pour le reste, il serait souhaitable de dresser un bilan complet des coûts de la part de la recherche financée par les contribuables et des bénéfices apportés par le programme nucléaire en termes de balance des paiements et d'emploi. Il serait aussi utile de comparer cette participation du contribuable à d'autres, à travers les prix de rachat de diverses autres sources d'énergie.

6.6 Le risque de perte de compétence

Certains dirigeants politiques de mouvement écologiste antinucléaire avancent l'idée que les risques à moyen et long terme du nucléaire ne sont pas compatibles avec les inconnues pesant sur l'évolution des sociétés humaines. Ils prennent en exemple quelques pays qui ont récemment subi une crise majeure ayant amené un délabrement de la structure nationale accompagné de désordres sociaux, facteurs possibles de perte de compétence mettant en avant le risque humain dans la gestion de l'énergie nucléaire.

Quels sont les catégories de risques humains possibles ? :

◇ Les risques liés à **des réactions humaines déficientes et dangereuses** dans la commande

manuelle des centrales. Ce problème n'est pas propre aux centrales nucléaires, mais à toutes les commandes sophistiquées exigeant une très grande rigueur et des réactions précises et immédiates face à de nombreux paramètres évoluant rapidement. On le retrouve dans le pilotage des avions, des trains à grande vitesse, des métros à haute densité de circulation et dans beaucoup d'autres applications. Outre la formation poussée du personnel chargé de ces équipements, qui n'a aucune raison de perdre de sa qualité, la robotique s'est développée et continuera à se développer pour répondre à ces situations où elle réagit de manière plus sûre que les hommes : peu de passagers de la ligne 14 du Métro parisien savent qu'ils sont conduits par un automate pendant toutes les heures de forte circulation où l'intervalle réduit entre rames ne serait pas tenable de manière fiable avec une conduite humaine. Le développement de la robotique est tel qu'il ne semble pas qu'il y ait du souci à se faire de ce côté. Si un robot avait géré la conduite de Tchernobyl, il n'aurait pas enfreint les règles de sécurité.

- ◇ Les risques liés à **une délinquance criminelle** croissante, associée ou non au terrorisme politique. Il y a peu de lieux aussi sécurisés qu'une centrale nucléaire, et ce type de délinquance a tellement d'autres cibles plus faciles que cet argument ne semble pas de grand poids. Il est beaucoup moins difficile de se procurer dans le milieu hospitalier que dans une centrale ou dans un centre de retraitement des matières radioactives pour la préparation de bombes sales. Le plus grave accident civil (non criminel) dû à la dispersion de matières radioactives a eu lieu au Brésil à Goiania où une source radioactive médicale a été jetée dans une décharge, dispersant du césium radioactif.
- ◇ Les risques liés à **une perte générale de compétence** par une baisse du niveau des élèves formés aux différents niveaux de l'enseignement. On peut penser que les problèmes qui font débat actuellement dans la plupart des pays développés en ce qui concerne la désaffection vis-à-vis des sciences n'auront pas de permanence et que ce n'est qu'une phase transitoire dans l'évolution de nos sociétés. Il faut d'ailleurs remarquer qu'une fraction suffisante de diplômés de haute qualité existe toujours.

Annexe 7

Négociations internationales

7.1 Les voies réglementaires et les autres

Dans la perspective d'un développement de la consommation mondiale d'énergie imposant pendant encore de nombreuses années un plein usage des énergies fossiles, la réflexion sur les méthodes de lutte contre l'effet de serre conduit à envisager des voies réglementaires contraignantes, assorties de normes, quotas, taxes et permis, nécessitant des accords internationaux.

L'objectif de respect de ces contraintes conduit à entreprendre des actions technologiques dont le coût détermine une valeur de la tonne de carbone (ou de CO₂) évitée, ce qui permet un marché du carbone basé sur les performances économiques plus ou moins grandes des différents procédés de réduction des émissions.

D'autres voies de réduction des émissions ne conduisent pas à un tel marché, ou peuvent réduire la valeur du carbone issue de ce marché, comme, par exemple :

- ◇ des actions civiques volontaires de sobriété énergétique ;
- ◇ une crise économique persistante ;
- ◇ une chasse aux GES autres que le CO₂ ;
- ◇ une hausse forte du prix des énergies fossiles forçant à une réduction de leur consommation ;
- ◇ l'apparition spontanée de nouvelles technologies de production d'énergie sans émission de GES.

Nous rappelons brièvement ci-dessous l'état des négociations internationales sur le sujet.

7.2 Les négociations internationales

Un programme relatif au changement climatique a été défini en 1979 conjointement par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) et le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (PNUE). Ce programme commun est, depuis 1988, suivi par le Groupement Intergouvernemental d'Expert sur l'Évolution du Climat (GIEC ou IPCC en anglais), créé par l'OMM et le PNUE. Une convention cadre a été signée à Rio de Janeiro au Brésil en 1992 par 154 états lors du Sommet de la Terre. L'objectif est de : « *Stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre dans l'atmosphère à un niveau permettant d'empêcher une interférence anthropique dangereuse pour le système climatique* ». Les signataires, aujourd'hui 190 états et la Commission européenne (CE) se répartissent en deux groupes : ceux qui prennent dès à présent des engagements de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre, dits pays de l'Annexe I (les pays développés et la majorité des anciens pays

de l'Est) et les autres, dits de l'Annexe II (les pays en voie de développement dont les dépenses, pour respecter leurs engagements, seraient financées par les pays développés et la CE).

Des réunions pour mettre en œuvre le traité ont lieu annuellement : Berlin 1995, Genève 1996, **Kyoto 1997 où fut signé un protocole fixant des objectifs de réduction d'émissions de GES pour les pays développés**, Buenos Aires 1998, Bonn 1999, Lyon 2000, Marrakech 2001, New Delhi 2002, Milan 2003; Buenos Aires 2004, Montréal 2005, Nairobi 2006, Bonn, Vienne, puis Bali en 2007.

Les textes retenus ont permis de définir les modalités de :

- ◇ fonctionnement d'un système d'observance ;
- ◇ mise en œuvre des mécanismes de flexibilité (MDP, MOC, puits de carbone et système d'échange des droits d'émission) ;
- ◇ lancement d'un marché international des droits d'émissions pour 2008 ;
- ◇ mise en place des modalités du transfert de technologies.

L'accord prévoit que pour la **première période d'engagement (2008-2012) le système ne sera pas juridiquement contraignant**. La décision de le rendre contraignant ne s'appliquera qu'à partir de la deuxième période d'engagement (2013-2017). Les sanctions iront de l'alourdissement des engagements de réduction après 2010 jusqu'à une exclusion du système d'échange de droits d'émissions.

Les mécanismes de flexibilité (de développement propre MDP et de mise en œuvre conjointe MOC) :

Mécanisme de développement propre (MDP) : dans ce mécanisme, un pays de l'Annexe I fournit un support technique à un pays hors Annexe I dans le cadre de projets participant au développement durable du pays hôte en réduisant ses émissions ou en améliorant les puits de GES dans ce pays. De cette façon, les pays de l'Annexe I peuvent ajouter les réductions ainsi réalisées à leurs propres réductions d'émissions.

Mise en œuvre conjointe (MOC) : ce mécanisme permet aux pays de l'Annexe I de coopérer sur des projets de réduction des émissions. Une action mise en œuvre conjointement doit permettre aux pays et, éventuellement aux industries, de gagner un crédit pour les émissions économisées. À noter que ni l'énergie nucléaire, ni le grand hydraulique n'ont été retenus dans les technologies du MDP ni du MOC.

Marché international des droits d'émission : l'objectif est de réduire le coût du respect des engagements. Tout pays signataire prévoyant de réduire ses émissions au-delà de l'engagement pris lors du Protocole pourra transférer ces réductions supplémentaires à un autre pays signataire ayant besoin de ces réductions pour atteindre ses objectifs. Avec un nombre suffisamment important de transactions internationales, un marché des réductions des émissions devrait voir le

jour et fournir des informations sur le coût marginal de la limitation des émissions des gaz à effet de serre.

Les principales difficultés des négociations : la première difficulté pour la mise en œuvre du Protocole de Kyoto réside dans le fait que les pays industrialisés ont des émissions de gaz à effet de serre continuellement croissantes, en particulier sous l'effet de la croissance des transports mais également pour certains pays sous l'effet de la croissance démographique et de leurs intérêts directs dans l'utilisation de leur ressources locales, même très génératrices de GES (charbon), et de leurs puits de carbone. Une difficulté supplémentaire vient de la difficulté de mesurer l'efficacité des puits de carbone liés aux cultures et aux forêts, d'ailleurs controversée.

Les Etats-Unis refusent les contraintes du Protocole, qu'ils considèrent « *trop coûteuses et pas assez efficaces* ». La non-signature initiale du Protocole par les Etats-Unis (et l'Australie mais qui vient de signer à Bali comme indiqué plus bas) engendre des accords bilatéraux traités au niveau de l'OMC. On note toutefois aux Etats-Unis la naissance de nombreuses actions non fédérales regroupant certains Etats se fixant des objectifs de réduction des GES. **Un marché du CO₂ se développe au sein de fédérations d'états sur les côtes Est et Ouest des Etats-Unis. Le monde attend un changement de position du gouvernement des Etats-Unis après les élections présidentielles de novembre 2008.**

D'autre part, à la suite d'un changement de gouvernement en 2007, l'Australie vient d'adhérer au protocole de Kyoto.

À la dernière réunion de Bali, bien qu'aucun engagement chiffré n'ait pu être obtenu, ni même qu'un chiffrage commun des objectifs de réductions d'émissions nécessaires puisse être établi, les Etats-Unis ont dû finalement accepter l'idée de revoir leur position et de participer à des négociations internationales sur la suite à donner au premier accord de Kyoto, qui selon la « feuille de route » définie à Bali, devraient s'ouvrir à partir d'avril 2008.

La position particulière de l'Europe : poursuivant les objectifs du Protocole de Kyoto assorti des mécanismes associés, et malgré l'opposition des Etats-Unis et de l'Australie, l'Union européenne a ouvert un marché du CO₂ en janvier 2005.

Dans les mécanismes proposés, des coûts de sanction en cas de dépassement des émissions sont indiqués : 145€ par tonne de carbone avant le 31/12/2007, 360 € par tonne de carbone après le 31/12/2007, ou deux fois le prix moyen du marché constaté sur une période de référence de l'année en cours.

En France, l'engagement est de maintenir nos émissions au niveau de 1990. Compte tenu du poids du nucléaire dans notre production d'électricité, il s'agit déjà d'un objectif ambitieux, car

les secteurs dont les émissions sont diffuses (habitat, transports) étant exclus de la directive, la charge réelle sur les gros émetteurs concentrés correspond à une réduction d'environ 25% des émissions à l'horizon 2010.

La signature du Protocole de Kyoto par la Russie fin 2004 a permis d'atteindre la majorité requise. L'Union européenne s'était, néanmoins, préparée à l'éventualité de la non-ratification, en déclarant son intention d'atteindre ses engagements avec ou sans protocole, bien que la majorité de ses membres ne soient probablement pas en mesure de respecter leurs engagements. La signature du protocole a eu lieu le 16 février 2005 et son entrée en vigueur le 30 novembre 2005 après l'adoption formelle de ses premières modalités de fonctionnement, lors de la Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Montréal.

Dispose-t-on d'un plan de secours si le protocole de Kyoto rencontrait d'autres obstacles au niveau mondial? Un programme, dénommé *Contraction et Convergence (C&C)* semble avoir réuni des adeptes. **Contraction** évoque évidemment la nécessité de réduire fortement les émissions globales de GES, **Convergence** évoque l'objectif final d'aboutir à des émissions proportionnelles à la population dans tous les pays, y compris les pays en voie de développement qui n'ont pas d'obligation dans le cadre du Protocole de Kyoto 1, ce qui constitue une des raisons du refus américain de ratifier ce Protocole.

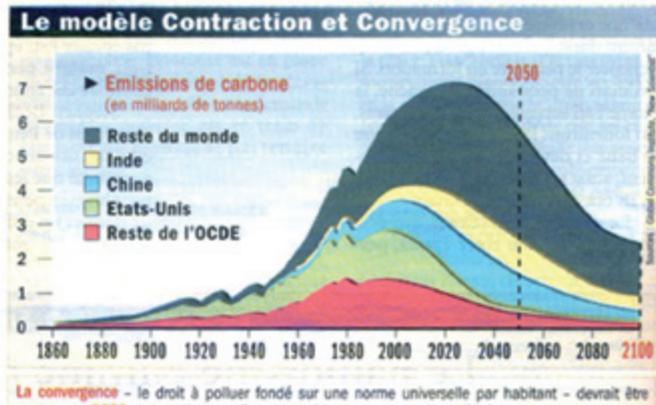
Pour accélérer cette convergence, l'idée du commerce des droits d'émission, qui existe dans le Protocole de Kyoto 1, serait conservée. Pour atteindre à terme la convergence, les pays les plus pollueurs comme les Etats-Unis devraient acheter une grande quantité de droits de polluer aux pays en développement qui sont en dessous de leurs droits futurs, ce qui accélérerait leur développement.

La figure 22 indique l'idée que se font les défenseurs de ce programme sur l'évolution des émissions de carbone des grands émetteurs mondiaux, sur la date de la pointe d'émissions (aux environs de 2030 avec 7 GtC pour 6 actuellement, et sur la décroissance des émissions globales vers 2 à 3 GtC en 2100).

On y notera que dans cette vision, la cible de l'OCDE est une réduction d'un facteur 3 à 4 d'ici 2050, et que pour les Etats-Unis, la chute envisagée est vertigineuse, avec un facteur de l'ordre de 10, ce qui suppose probablement un développement intensif de la séquestration du CO².

Figure 22

(source : Global Commons Institute. «New Scientist»)



7.3 Effets vertueux et pervers possibles des politiques tarifaires et fiscales

Comment internaliser les coûts dus à l'impact sur la santé et l'environnement ?

Ce concept a été utilisé plusieurs fois. Il consiste à intégrer les éléments de modification de l'environnement (santé humaine, gaz à effet de serre, émissions polluantes, etc.) dans la sphère de l'économie en leur affectant un coût qui vient renchérir telle forme de production d'énergie par rapport à une autre.

L'avantage est évidemment de laisser les acteurs économiques, de façon décentralisée, faire les arbitrages les plus pertinents en pondérant ainsi les différents facteurs. Cet avantage est tout à fait réel et a montré son efficacité aux Etats-Unis pour réduire les émissions d'oxydes d'azote et de dioxyde de soufre.

Toutefois, cette approche est concrètement difficile à mettre en œuvre. En effet, les cas où l'impact économique d'une nuisance peut être clairement chiffré sont très rares (existence d'assurances pour le dommage, etc.). C'est pourquoi les pays se sont le plus souvent tournés vers une législation contraignante en matière d'environnement. Les acteurs économiques, notamment les entreprises, doivent respecter des normes qui sont, de facto, assez largement négociées mais qui, surtout, dépendent de chaque pays.

Dans ces conditions, définir un prix pour une pollution donnée dans un pays donné est très difficile puisque chaque secteur technique supporte un coût différent pour atteindre une norme d'émission commune. Lorsqu'on veut néanmoins mener une politique d'émission de permis – et

qu'aucun moyen simple tel qu'une assurance ne permet d'en fixer le montant – on laisse le marché décider des prix d'émission mais dans ce cas les quantités échangeables doivent être précisées.

La définition d'une allocation pour chaque émetteur est donc nécessaire. Celle-ci peut se faire, soit aux enchères comme cela a été tenté en Grande Bretagne avec un succès mitigé, soit sous la forme d'allocations gratuites « héritées » (grand-fathering) estimées à partir des émissions produites dans le passé. Cette dernière solution a été choisie dans la plupart des cas. Elle pose le problème des nouveaux entrants qui ne peuvent hériter de rien. Les négociations de mise en place sont donc ardues et partiellement arbitraires. La situation devient à peu près inextricable si on veut un prix international. Enfin, cette approche est aussi rejetée dans son principe, même par certains mouvements associatifs car analysée comme un droit à polluer ou pire encore, à tuer !

7.3.1 Des permis échangeables pour la lutte contre les gaz à effet de serre

C'est pourtant ce qui est tenté aujourd'hui pour les émissions de gaz à effet de serre car les avantages de cette démarche sont importants. En effet, la Commission européenne met en place un marché de permis pour atteindre les objectifs du Protocole de Kyoto. Le prix d'échange des permis d'émission de gaz à effet de serre est fixé par un marché libre auquel ne participent, pour la première période, que les industries grosses émettrices sur le territoire européen. Les quantités allouées à chaque émetteur se font au niveau de chaque état membre : la cible de Kyoto étant fixée pour chaque état.

Même si les attitudes contrastées des différents pays autour du Protocole de Kyoto (refus des Etats-Unis, tergiversations de la Russie) rendent caduques la plupart des hypothèses utilisées ; il est quand même utile d'analyser les grandes tendances prédites par les économistes si un prix international existe pour l'émission de gaz à effet de serre.

Une abondante littérature existe sur le sujet et de nombreux modèles ont été développés. Ces modèles reposent sur un certain nombre d'hypothèses sur les données et sur la modélisation elle-même :

- ◇ les hypothèses de développement dans le monde des 20 prochaines années (scénario de base) ;
- ◇ les hypothèses sur les courbes coût-efficacité des différentes mesures de diminution des émissions de CO₂ ;
- ◇ les hypothèses faites sur la segmentation géographique et sectorielle ;
- ◇ enfin sur la modélisation elle-même : prise en compte de la technologie, des équilibres généraux, etc.

Les résultats varient alors considérablement, néanmoins, certains semblent clairement établis :

- ◇ la mise en place de permis échangeables est une manière très efficace d'atteindre les objectifs à un coût minimal pour la collectivité ;
- ◇ l'efficacité du marché des permis est d'autant plus grande qu'un grand nombre d'acteurs participent à la fois du point de vue géographique et du point de vue des secteurs. L'obtention d'une baisse donnée des émissions de GES se fait à un prix bien moindre si le marché est ouvert à de nombreux acteurs (un facteur supérieur à 10 suivant les hypothèses). En particulier, le fait que les Etats-Unis participent ou non change tout. De même, l'encouragement des économies d'énergie ne devient véritablement efficace que si le secteur des transports et celui de la construction sont inclus ;
- ◇ la réponse par secteur est assez différente. En particulier, les réductions viennent d'abord de l'industrie car les mesures qui y sont prises sont les plus efficaces. Cependant, ce secteur est très disparate et des mesures efficaces peuvent être très spécifiques d'une activité. Ainsi, l'industrie des engrais dispose de mesures efficaces relativement abordables pour limiter les émissions de N_2O ;
- ◇ enfin, l'exclusion de certaines parties soit géographiques soit sectorielles pour des raisons tout à fait compréhensibles peuvent entraîner des effets pervers difficiles à anticiper, par exemple :
 - Importation de demi-produits en provenance de pays en développement exemptés, augmentant finalement les émissions globales en les délocalisant, ou importation d'électricité à partir de centrales moins performantes, mais de pays exemptés.
 - Transferts des consommateurs d'un produit fabriqué par un gros émetteur concentré vers un autre produit fabriqué par un secteur émetteur diffus exempté, alors que globalement les émissions de GES peuvent être augmentées.
 - Enfin les écarts de développement entre pays rendent très aléatoires des coûts mondiaux pouvant générer des transferts de permis de pays émergents vers pays développés, alors qu'il eut été préférable de traiter les émissions dans le pays émergent. Exemple : l'Inde peut préférer vendre ses permis car ce sera plus rentable que de modifier ses propres installations.

Certes, les mécanismes mis en place : CDM, etc., devraient atténuer ces effets mais ils restent néanmoins assez puissants.

Ceci n'enlève rien à l'intérêt du commerce de permis mais souligne les difficultés de sa mise en place, surtout dans le contexte actuel où des continents entiers et des secteurs entiers seraient exemptés. Cependant, une fois cette période passée, on peut espérer par ce biais décentraliser au mieux les décisions techniques et optimiser l'efficacité économique de l'ensemble.

La plupart des modèles qui incluent la technologie concluent vers 2020 :

- ✓ à une présence accrue mais toujours marginale des énergies renouvelables ;
- ✓ à un basculement significatif du charbon vers le gaz malgré une augmentation du prix du gaz ;
- ✓ à un redémarrage du nucléaire dans des proportions significatives mais minoritaires ;
- ✓ à une place non-négligeable des économies d'énergie, pourvu que le marché des permis soit assez vaste.

Au-delà de 2020, les avis divergent complètement car les évolutions technologiques deviennent significatives.

En conclusion, même si les prévisions sont aléatoires, un réel effort de connaissance dans ce domaine est nécessaire et cet effort doit être soutenu.

En résumé, si on peut internaliser des coûts d'émission de CO₂ - ou plus généralement de dommages faits à l'environnement - ce sera la manière la plus efficace de limiter les dommages à un coût minimal pour la communauté. Cependant, la mise en place constitue une étape redoutable qui doit être franchie avec beaucoup de précaution si on veut éviter certains effets pervers évoqués ci-dessus.

Annexe 8

Une conception équilibrée du risque¹

Il est banal de rappeler que le risque zéro n'existe pas et qu'aucune de nos actions n'est exempte de la prise d'un risque, si faible soit-il : sortir en voiture ou marcher à pied, manger ou ne pas manger un bifteck, rester chez soi...

8.1 Pourquoi accepte-t-on des risques? et dans quelles limites?

Le degré d'acceptation du risque par le public est fortement variable :

- ◇ selon qu'il s'agit d'un **risque choisi** – dont on attend ou espère une contrepartie positive (utiliser sa voiture, manger un bifteck, miser dans un jeu ou une course...) – ou d'un risque subi qui s'impose à l'individu sans perception directe de la contrepartie ;
- ◇ selon qu'il s'agit d'un **risque subi d'origine majoritairement naturelle** contre lequel l'individu se sent désarmé (tremblement de terre, inondation...), où le seul recours est l'assurance qui apporte une certaine compensation, ou bien d'un **risque subi d'origine humaine** résultant de choix controversés, dont une partie du public ne perçoit pas clairement s'il existe une contrepartie positive (OGM, farines animales, énergie nucléaire...), risques contre lesquels des actions semblent possibles au public pour l'éviter ou le réduire ;
- ◇ selon qu'il s'agit d'un **risque visible** et simple à comprendre, répétitif et de conséquences individuellement limitées, dont le public s'est habitué à la gravité statistique, mais qu'il tolère comme une rançon du progrès (5 à 6 000 morts par an sur les routes de France, milliers ou dizaines de milliers de morts annuels dans le monde par l'exploitation du charbon), ou bien d'un **risque invisible** dont le mécanisme plus subtil et plus difficile à comprendre pour une part du public, dont les conséquences réelles peuvent éventuellement être plus limitées (vache folle ou ESB²), et même possiblement globalement positives (OGM, énergie nucléaire), mais dont la perception se prête aux fantasmes catastrophistes.

1. Cette section reprend quelques-unes des idées exprimées dans le *Traité des nouveaux risques* Olivier Godard, Claude Henry, Patrick Lagadec, Erwan Michel-Kerjan, Gallimard Folio actuel octobre 2002

2. ESB - Encéphalopathie spongiforme bovine.

Un outil essentiel de la maîtrise du risque est le principe de précaution, mais ce vocable recouvre divers énoncés entre lesquels le bon sens permet de se situer raisonnablement

Certains énoncés extrémistes du principe de précaution interdisent toute application pratique :

- *S'abstenir de tout risque aux conséquences « apocalyptiques »* (Hans Jonas), facile à écrire ! comment prouver qu'une action ne présente aucun (probabilité zéro) risque lointain de ce genre? Et l'absence actuelle de preuve de potentiel apocalyptique d'une action ne constitue pas une preuve de l'absence de ce potentiel.
- *Ne s'engager dans une action que si la preuve de son innocuité a été apportée* (exige une probabilité nulle sur les conséquences négatives et ne prend pas en compte les conséquences positives). Cette version du principe de précaution est fréquemment utilisée par les opposants à telle ou telle option.
- *La création d'un risque potentiel doit être assimilée à un dommage indemnisable* (Nicolas de Sadeleer), ce qui implique que sortir en voiture ou vendre du bifteck obligerait à indemniser la société pour le risque potentiel qu'on lui fait courir.

De tels libellés sont inapplicables et tendent à paralyser toute innovation, et même toute action. Ils risquent, par une judiciarisation de la société quelquefois déjà perceptible, de transformer le principe de précaution en recherche rétrospective de culpabilité, considérant comme fautif tout comportement qui n'aurait pas choisi l'abstention ou l'interdiction face à un risque suspecté.

Le libellé le plus judicieux est celui exprimé dans la loi N° 95-101 sur l'environnement :

« L'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement, à un coût économiquement acceptable. »

Ce principe, adossé à la Constitution française en 2005, recommande qu'une action précoce de prévention n'attende pas que le progrès des connaissances ait transformé un risque potentiel en risque avéré. Il recommande aussi que ce principe de précaution soit pris en compte d'autant plus tôt et d'autant plus largement que le dommage risqué est sérieux et/ou irréversible, et que l'incertitude est plus forte, quitte à desserrer l'étau peu à peu et à réviser les mesures prises en fonction de l'évolution des connaissances. C'est ce principe qui conduit à prendre en compte le changement climatique comme donnée majeure dans les choix énergétiques du futur. C'est un **principe de précaution « proportionnée »**, utilisable et non plus un principe absolu inapplicable. Cette philosophie du risque se résume en deux phrases :

- ✓ Il n'est pas raisonnable d'exiger des certitudes sur l'existence d'un dommage pour commencer à prendre des mesures préventives.
- ✓ Il n'est pas plus raisonnable d'exiger des certitudes sur l'absence d'un dommage avant d'autoriser une activité.

Dans un monde controversé constitué de nombreux acteurs aux croyances, attitudes et intérêts divers, la précaution doit s'inventer, après une expertise de qualité, dans l'entre-deux borné par ces deux attitudes déraisonnables extrêmes :

- ◇ elle exige que tous les scénarios d'évolution possibles soient examinés avec sérieux, sans pour autant ne retenir que les scénarios du pire, et en n'oubliant jamais de peser les risques entre eux, la réduction d'un risque pouvant en augmenter un autre ;
- ◇ elle suppose même d'accepter certains risques limités à fort potentiel d'observabilité s'ils permettent de mieux connaître ces risques. L'idéal serait évidemment d'«internaliser» les différents risques mais, comme expliqué dans l'Annexe 7, ceci paraît irréaliste politiquement et socialement ;
- ◇ elle impose surtout d'agir dans la transparence, ce qui exige de mettre les idées à l'épreuve de la contestation par le débat public, sous la condition de compétence et pertinence suffisantes des opinions émises. La diffusion de l'information et le débat public peuvent contribuer à transformer les risques subis et mal estimés, provoquant le rejet, en risques mieux mesurés et choisis lorsqu'ils ont des contreparties positives suffisantes.

8.2 Le public a-t-il une conception équilibrée du risque ?

Plus qu'aux statistiques, une partie du public est sensible à trois critères :

- ✗ le bénéfice qu'il attend en contrepartie du risque qu'il prend ;
- ✗ la gravité individuelle du danger lié au risque (accident ou effets des rayonnements ionisants) ;
- ✗ la complexité de la source potentielle de danger lorsqu'il se sent incapable d'en appréhender les mécanismes.

C'est pourquoi la statistique de 6 000 tués par an en voiture ne le dissuade pas de rouler dans la sienne parce le mécanisme des accidents de voiture est fort simple et compris de tous, et que l'usage de la voiture lui apporte un bénéfice direct, alors que pour le nucléaire, la complexité du sujet, la perception imprécise de ses conséquences réelles ont généré une méfiance confuse, aggravée par l'accident de Tchernobyl et les polémiques qui l'ont suivi.

Le public ne met pas sur le même plan le risque climatique, d'évolution lente, qu'il croit peut-être supportable, et le risque nucléaire. Que l'on considère les risques liés aux accidents nucléaires causant des dégâts immédiats ou les risques différés liés aux faibles doses d'exposition, on retrouve dans l'esprit du public la crainte de conséquences catastrophiques, soit dans le présent (accidents), soit dans le futur (déchets, faibles doses d'irradiation).

- ✓ le risque d'accident nucléaire (type Tchernobyl avec morts instantanées ou quasi instantanées par doses d'exposition mortelles) pour les réacteurs occidentaux est extrêmement faible. Une partie du

public considère cependant que puisque la probabilité d'un tel accident n'est pas rigoureusement nulle, il vaut mieux s'abstenir d'exploiter l'énergie nucléaire. C'est appliquer la forme viciée du principe de précaution citée en n° 2 : *ne s'engager dans une action que si la preuve de son innocuité a été apportée*, qui exige une probabilité nulle irréaliste pour les conséquences négatives d'une action, et ne pas prendre en compte ses conséquences positives. On ne revient pas ici sur les conséquences de Tchernobyl, évoquées précédemment, mais il est vrai que si cet événement a fortement marqué les esprits, c'est que des explications très insuffisantes sur ses conséquences sanitaires ont été données et ce pendant plusieurs années. Cela a favorisé une désinformation qui persiste.

✓ **L'évaluation des coûts des accidents** : le public manquant souvent de points de repères dans ce domaine, une évaluation déformée de certains coûts a souvent été une arme utilisée pour défendre telle ou telle thèse. Le débat sur le coût réel du nucléaire en est un exemple. Un autre exemple est apparu au cours du débat national sur l'énergie où un intervenant a cité un coût de l'accident de Tchernobyl de 200 milliards d'Euros. La vérité est probablement que personne ne saura jamais combien Tchernobyl a coûté ! Néanmoins, il est possible d'évaluer quelques ordres de grandeur en prenant comme base le coût des terres « gelées » [2 800 km²] et le coût du relogement des populations déplacées [220 000] : le total est largement inférieur à 10 milliards d'Euros avec des prix français³ ; il y a plus d'un ordre de grandeur d'écart.

◇ Au début des années 1980, après l'accident de Three Mile Island, l'IPSN avait défini 3 niveaux de conséquences d'un accident ayant entraîné la fusion d'un cœur de réacteur : S1, S2 et S3.

S1 correspondait à la fusion du cœur accompagnée de la rupture de l'enceinte de confinement ; S2 à une fusion suivie dans les jours suivants de fuites importantes de l'enceinte, S3 à une fusion suivie de la mise en œuvre d'un certain nombre de procédures visant à limiter les rejets de produits radioactifs.

Les rejets de Tchernobyl ont été du niveau S1. S3, correspondant à un accident de fusion de cœur d'un réacteur français, est environ 1% de S1, donc de Tchernobyl : autant dire que l'ordre de grandeur du coût des effets externes d'un tel accident serait la centaine de millions d'Euros, sensiblement inférieur au coût « interne » lié à la perte du réacteur. Une agression de type « 11 septembre » sur une centrale n'entraînerait pas de fusion de cœur si on en croit l'étude publiée par un groupe de membres de la National Academy of Engineering (NAE) américaine fin 2002 et ses conséquences seraient encore bien inférieures à S3.

✓ **Le risque des déchets dits de forte radioactivité et à vie très longue, supposé enfouis**, se présente différemment car il concerne le long terme. Il s'agit d'un risque d'exposition à des faibles émissions radioactives à la biosphère dans des centaines de milliers d'années et persistant sur des durées encore plus longues.

3. En prenant 5 000 € par hectare et 100 000 € par logement.

La modélisation des phénomènes pouvant se dérouler à ces époques du futur est, certes, difficile mais elle montre, comme on l'a dit, que les doses qui pourraient être délivrées à un homme ne dépasseraient pas celles dues à la radioactivité naturelle (celle d'aujourd'hui) Quant aux risques d'exposition par intrusion dans un stockage, scénario envisagé dans les analyses de sûreté, il n'intéresserait que quelques individus alors soumis à des doses du domaine des effets directs bien connus.

Une voie de recherche pour essayer de réduire ces risques à très long terme consiste à transmuter les radionucléides de plus longue période en radionucléides à vie plus courte. Mais ce sera une opération difficile, pour un bénéfice discutable, qui nécessite la poursuite de l'exploitation de l'énergie nucléaire (un à deux siècles dans le meilleur des cas) et qui n'évitera pas le stockage géologique des déchets ultimes, contenant certes moins d'actinides que ceux d'aujourd'hui, mais en augmentant notablement les quantités de matières radioactives à manipuler aujourd'hui.

✓ **Le risque d'émission de radioactivité faible sur une population nombreuse**

La radioactivité émise de façon permanente par une centrale nucléaire en fonctionnement normal, ou par un centre de traitement des combustibles usés comme celui de La Hague, ou encore par les retombées d'un nuage radioactif comme celui de Tchernobyl sur la France en 1986, est très inférieure à la radioactivité naturelle. Finalement tous les débats à propos du danger de la radioactivité reviennent à une interprétation de la loi de protection du public contre les rayonnements ionisants.

C'est une loi volontairement pessimiste, qui revient à considérer que le risque d'apparition de cancers mortels (effet stochastique) dans une population est proportionnel à la faible dose reçue ajoutée à la dose naturelle. Cette loi linéaire sans seuil conduit à estimer que dans une telle population où chacun est exposé, il y aura apparition d'un cancer par an pour 100 000 individus qui auraient chacun reçu 1 mSv par an. Mais il s'agit d'une loi extrapolée à partir de statistiques portant sur des individus ayant reçu des doses bien au-delà des faibles doses, de sorte qu'on ne sait si il y a un effet de seuil. Cette loi constitue une précaution d'ordre réglementaire, mais elle n'a pas de valeur prédictive du risque d'un point de vue scientifique.

L'observation directe de l'effet des faibles doses à l'aide d'études épidémiologiques nécessite de disposer de populations très importantes, stables, homogènes et recevant des doses différenciées et connues. Aucune des études faites à ce jour n'a pu mettre en évidence d'effet des faibles doses, malgré les très fortes variations de la radioactivité naturelle dans le monde, mais ceci ne constitue pas une preuve absolue de l'existence d'un seuil.

La connaissance de l'effet des rayonnements ionisants a reposé jusqu'à une date récente sur des recensements et des statistiques portant sur des malades traités en radiothérapie et sur des victimes d'irradiations accidentelles ou militaires, au premier rang desquels les survivants

de Hiroshima et Nagasaki. Cette connaissance ne s'améliore qu'après un nombre considérable d'observations demandant temps et sérieux. Elles sont toujours en cours. Cette difficulté peut accentuer un sentiment d'incertitude et explique une partie des discordances sur les conséquences sanitaires de Tchernobyl.

La connaissance de l'effet des très faibles doses fait de grands progrès depuis 10 ans par la recherche sur les mécanismes d'atteinte et de réparation de l'ADN de la cellule et la protection des tissus par l'apoptose des cellules trop atteintes. Aussi la loi linéaire sans seuil reliant la dose et l'effet est-elle de plus en plus mise en doute.

Citons encore ici une des recommandations issues du colloque du 25 juin 2003 de l'Académie nationale de médecine : « *Encourager un effort de recherche important dans le domaine des mécanismes et de l'évaluation des effets sanitaires des faibles doses, qu'il s'agisse de toxiques chimiques ou radioactifs, en rappelant que « l'estimation des conséquences sanitaires des faibles expositions (inférieures à quelques mSv) ou de faibles concentrations de carcinogènes au moyen d'une relation dose-effet linéaire sans seuil n'a pas de justification scientifique* ».

Il est donc nécessaire de mieux informer le public sur les risques et les dangers réels encourus : L'acquisition d'une conception équilibrée du risque, ainsi que des ordres de grandeur des coûts, devrait permettre au public de ne pas diaboliser le risque nucléaire, de le considérer sur le même plan que les autres risques industriels, et d'établir progressivement un consensus suffisamment solide pour prendre des décisions raisonnées et résister dans la durée aux inévitables accidents de parcours communs à tous les développements énergétiques.

Annexe 9

Recherches influençant la prospective. Vecteurs d'énergie

L'évolution de la problématique « énergie environnement » dans les décennies à venir sera jalonnée par un certain nombre de clarifications dont nous avons évoqué quelques-unes :

- ◇ l'aboutissement des études de stockage souterrain des déchets nucléaires ;
- ◇ une confirmation des risques majeurs de l'effet de serre ;
- ◇ une meilleure connaissance des possibilités de stockage du CO₂.

Elle sera jalonnée, à plus long terme, par quelques dates clés, telles que :

✓ **Vers 2020 – 2030 :**

- ◇ le début de déflation de la production de pétrole ;
- ◇ une meilleure prévisibilité de la consommation mondiale d'énergie, après 2050 ;
- ◇ les voies technologiques susceptibles de déboucher pratiquement au-delà de 2050.

✓ **Vers 2050 :**

- ◇ une meilleure prévisibilité de début de déflation du gaz naturel ;
- ◇ la mise en œuvre de nouvelles technologies imprévues actuellement.

L'examen de ces différentes dates incite à rester très modeste quant à notre capacité à prévoir l'avenir, même dans le domaine somme toute restreint de l'énergie. Il incite, en revanche, à être extrêmement vigilant, et à tout faire pour identifier des « politiques de précaution » permettant d'éviter d'être surpris par des crises plus ou moins graves affectant le secteur énergétique.

L'horizon technologique est probablement celui où l'Académie des technologies peut essayer de porter quelque lumière en scrutant les recherches et développements en cours dans le domaine de l'énergie.

Nous classerons les R&D qui peuvent avoir une incidence majeure sur la réflexion prospective en quatre catégories :

- ✓ L'exploitation des énergies primaires
- ✓ Les vecteurs d'énergie
- ✓ Les nouvelles utilisations de l'énergie (PAC,...)
- ✓ Les nouvelles sources d'énergie (fusion, solaire satellitaire,...)

9.1 Meilleure exploitation des énergies primaires

Dans ce domaine, les R&D qui peuvent amener des changements notables dans la prospective énergétique concernent essentiellement :

- ✗ la découverte de nouveaux gisements pétroliers et gaziers et la surexploitation des anciens, à court terme ;
- ✗ la séquestration du CO₂, à moyen terme ;
- ✗ les centrales à charbon à émission réduite, à moyen terme.

Ces aspects ont été abordés dans le cours du rapport.

9.2 Les vecteurs d'énergie

Nous considérons comme vecteur d'énergie une **forme d'énergie non primaire transportable, si possible stockable, utilisable en un lieu différent de sa production, ou sur un véhicule** (bien sûr, certaines énergies primaires comme le pétrole, le gaz et le charbon sont en même temps des vecteurs, par leur transportabilité sur de longues distances).

9.2.1 Le vecteur électrique

L'énergie électrique se développe à un rythme supérieur à celui de toutes les autres formes d'énergie primaire, grâce à sa grande commodité et diversité d'emploi ; c'est la forme la plus moderne de consommation d'énergie. Deux milliards d'hommes n'ont pas encore accès à cette forme d'énergie et les statistiques de l'OMS indiquent que l'espérance de vie chez les populations n'ayant pas encore accès à l'électricité est fortement réduite.

L'électricité est aujourd'hui le seul vecteur disponible pour les énergies renouvelables d'origine mécanique ou solaire ainsi que pour l'énergie nucléaire. Il en résulte que toute politique énergétique visant à limiter la part des énergies fossiles doit, en même temps, s'assurer que l'énergie électrique appelée pourra être produite.

L'énergie électrique est l'exemple type du vecteur d'énergie dont on connaît les immenses qualités, mais aussi son gros défaut : ne pas être stockable directement et économiquement, si ce n'est en pompant de l'eau dans des réservoirs en altitude, solution onéreuse et qui ne peut être utilisée que sur certains sites favorables. Le vecteur électrique se développerait encore plus rapidement, notamment comme source embarquée dans l'automobile, si les performances du stockage de l'électricité étaient très supérieures à celles des batteries actuelles (autonomie de 50 km pour 500 nécessaires, vitesse de recharge de 1 à 2 km par minute au lieu de 100 à 200 km pour les hydrocarbures quand on passe à la pompe).

Le GT «Stockage de l'énergie électrique » a fait le point sur ce problème. Cet axe de recherche continue à être important pour l'avenir, à la fois en extrapolant les techniques d'aujourd'hui mais aussi en cherchant des idées en rupture.

9.2.2 Le vecteur hydrogène

La prise de conscience de la raréfaction prochaine des ressources pétrolières, et aussi de la nécessité de réduire rapidement les émissions de CO₂ donnent une grande ampleur aux recherches visant à utiliser l'hydrogène (ou des dérivés de l'hydrogène) comme carburant, ce qui génère des analyses technico-économiques extensives sur les moyens de production, de transport, de stockage, de distribution et d'utilisation de l'hydrogène. Plusieurs congrès nationaux, européens ou internationaux ont lieu chaque année sur l' «hydrogène-énergie».

À première vue, l'attrait de l'hydrogène semble en effet considérable pour la traction automobile, sa combustion ne laissant comme déchet que de l'eau, sans aucune émission de CO₂ ni d'autres polluants, et le rendement de l'opération étant par ailleurs accru si cette combustion est réalisée par une pile à combustible alimentant une motorisation électrique, évitant le cycle thermodynamique de Carnot défavorable au rendement des moteurs à combustion interne. Tous ces atouts permettent notamment d'envisager des villes propres.

L'explosion des recherches est mondiale, assortie de budgets impressionnants et donne lieu à des accords de coopération entre laboratoires nationaux, européens et internationaux, afin d'éviter la dispersion des recherches et d'assurer la convergence des programmes : exemples Pan'H, H2E (Horizon Hydrogène Energie), Hyways, le programme européen JTI (Joint Technology Initiative) Hydrogène énergie, et le programme international IPHE. Cette coordination vise à accélérer l'entrée dans ce que certains appellent déjà «l'économie de l'hydrogène».

On doit tout de même rappeler que, contrairement à la prédiction de Jules Verne¹, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie, mais seulement un vecteur d'énergie, celui dont on parle le plus comme vecteur énergétique du futur. Son utilisation comme combustible pour une motorisation propre des véhicules ou pour la génération de chaleur et d'électricité fixe ou mobile ou comme composant de synthèse de carburants liquides, est-elle un rêve ? Sa médiatisation n'est-elle pas excessive ? Cet attrait mérite d'en analyser un peu plus en détail les différents aspects:

Comment produire l'hydrogène? L'hydrogène, bien que représentant 98% de la masse de l'Univers, n'existe pas sur Terre sous sa forme élémentaire, mais seulement sous forme combinée à d'autres éléments dont il faut l'extraire, principalement l'eau et les hydrocarbures.

1. « Je crois que l'eau sera un jour employée comme carburant, que l'hydrogène et l'oxygène qui la constituent, utilisés seuls ou ensemble, fourniront une source inépuisable de chaleur et de lumière... » *L'île mystérieuse* Jules Verne 1874

Compte tenu de son extraction à partir de ces composés, la production d'hydrogène n'est ni thermodynamiquement efficace, ni rentable ni écologique actuellement pour cet usage énergétique. L'hydrogène est produit actuellement pour 98% à partir d'hydrocarbures, pour les usages de la sidérurgie, de la pétrochimie, de la chimie et de l'industrie spatiale, à un coût par unité d'énergie de 2 à 5 fois celui des hydrocarbures de départ.

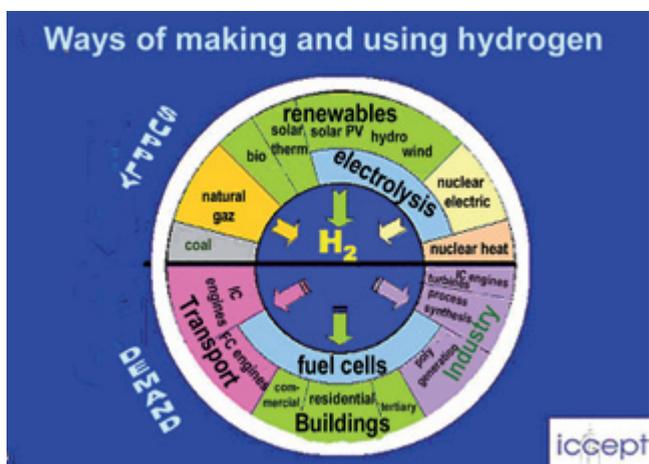
Cette solution, trop coûteuse pour une utilisation énergétique de H₂, est en outre peu durable compte tenu de l'épuisement prochain des réserves fossiles, et émet en sous-produit du CO₂ qui contribue à l'effet de serre.

Mais demain ? L'hydrogène peut être produit à partir d'une multitude de sources, et par des procédés très variés : charbon, gaz naturel, éthanol ou résidus pétroliers par reformage, associés au captage-stockage du CO₂ émis, eau par électrolyse ou par dissociation thermochimique, biomasse par pyrolyse ou par fermentation biochimique, éventuellement associées au solaire, nucléaire par dissociation de l'eau à haute température ou électrolyse à chaud, solaire, etc.

Dans beaucoup de ces filières, l'usage d'un catalyseur adéquat est nécessaire pour aider la thermodynamique en permettant des réactions chimiques à des températures plus facilement accessibles.

La figure 23 résume les divers moyens de production et les diverses formes d'utilisation de l'hydrogène

Figure 23



Aucune filière n'est totalement exempte d'émission de CO₂. Toutes les filières partant d'hydrocarbures rejettent du CO₂. La seule voie n'utilisant pas de produits carbonés est celle de l'eau, soit par

électrolyse, soit par dissociation thermique, mais pour être «verte», cette voie doit utiliser une énergie elle-même «verte» pour fournir l'énergie électrique ou thermique nécessaire pour casser la liaison moléculaire de l'eau².

Une tendance forte est de chercher à produire l'hydrogène à partir d'énergies renouvelables, on rêve de compenser l'imprévisibilité de fonctionnement des éoliennes en stockant l'énergie électrique produite lorsqu'elle n'est pas demandée sous forme d'hydrogène, ce qui pousse au développement de moyens décentralisés de petites unités de production (par électrolyse dans ce cas) dont la rentabilité n'est pas assurée.

L'électrolyse de l'eau, plus efficace à chaud, exige de disposer d'une source massive d'électricité bon marché et n'émettant pas de CO₂ : nucléaire?, ou grand hydraulique africain?, en Islande, on développe cet hydrogène «vert» à partir de la géothermie par électrolyse d'eau chaude, une partie de l'énergie de dissociation de la molécule d'eau étant apportée gratuitement par la chaleur souterraine.

La dissociation thermochimique de l'eau exige de disposer d'une source massive de calories bon marché. Les réacteurs nucléaires VHTR pourront-ils être une solution?

On doit en outre noter que pour les applications en pile à combustible PEMFC et en stockage sur hydrures, une très grande pureté de l'hydrogène est nécessaire pour permettre une durée de vie suffisante des catalyseurs ou un nombre de cyclages acceptable des hydrures. Tous les moyens de production ne permettent pas cette pureté.

Comment transporter l'hydrogène?

Outre les problèmes de sécurité que pose l'hydrogène par son caractère explosif en présence d'air (oxygène) et de source de chaleur, l'hydrogène est handicapé par ses propriétés physiques: la médiocrité de son pouvoir énergétique volumique (1/3 de celui du gaz naturel) handicape son transport sous forme de gaz comprimé par canalisation (transport environ 3 fois plus cher que le gaz naturel, 15 fois plus cher que le pétrole, par unité d'énergie transportée). Une autre propriété physique défavorable de l'hydrogène est de fragiliser les métaux.

Des réseaux régionaux de distribution d'hydrogène existent cependant déjà dans le Nord de la France et en Belgique, entre usines sidérurgiques et chimiques. La création d'un vaste réseau de transport et distribution pose vis-à-vis du développement de l'hydrogène dans les transports routiers le problème de la poule et l'œuf : l'un ne pourra se développer qu'à partir de l'émergence de l'autre, c'est pourquoi certains pensent que la première étape d'application des piles à combustibles aux véhicules routiers ne se fera probablement pas en utilisant de l'hydrogène distribué en station service, mais à partir d'hydrocarbures du réseau de distribution classique, par reformage

2. L'électrolyse de l'eau à partir de l'électricité européenne moyenne émet 4,5 kg CO₂/Nm³ d'hydrogène, alors que le reformage chimique du gaz naturel n'en émet que 1 kg CO₂/Nm³.

embarqué. Pour la distribution par réseau, des étapes intermédiaires seront nécessaires, il est envisagé d'utiliser le réseau de gaz naturel en y introduisant des proportions croissantes d'hydrogène.

Est aussi envisagé le transport « électrique » de l'hydrogène, en le produisant localement dans les stations service au moyen de petits électrolyseurs. En ce cas, le transport de l'hydrogène est remplacé par le transport de l'électricité, et la puissance supplémentaire à investir sous forme électrique serait considérable.

Comment distribuer l'hydrogène?

La distribution au véhicule en toute sécurité et en un temps acceptable pose des problèmes complexes, que ce soit sous forme de gaz comprimé à 350 ou 700 bar (CGH₂), ou sous forme liquéfiée à -253°C (LH₂). Compte tenu de la très haute pression, de la dangerosité des fuites, ou de la très basse température, des automates de raccordement entre le véhicule et le poste de distribution sont indispensables. La commodité et la durée du remplissage en sont affectés. Dans le cas du CGH₂, un remplissage en 3 minutes ne doit pas faire monter la température du réservoir de plus de 85°C, et une surpression de remplissage par rapport à la valeur nominale, nécessaire pour compenser le refroidissement ultérieur ne doit pas excéder 50 à 70 bar. Dès aujourd'hui des automates de remplissage permettent un débit de remplissage de l'ordre de 3 kg d'hydrogène en moins de 3 minutes.

Compte tenu des incertitudes sur la forme sous laquelle sera distribué l'hydrogène dans le futur, il est envisagé en période intermédiaire quelques stations de distribution mixtes (CGH₂ et LH₂). Des stations de distribution encore un peu expérimentales s'implantent dans de plus en plus nombreux pays, avec des solutions techniques diversifiées pour la production et le stockage, en Allemagne à Berlin (par reformage de gaz naturel), à Munich (avec stockage souterrain), à Tokyo et Yokohama, à Reykjavik (par électrolyse d'eau chaude géothermale), et en Californie sur la déjà célèbre route de l'hydrogène lancée par le gouverneur Schwarzenegger où l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'une électricité provenant d'éoliennes.

La construction de ces stations de distribution est fortement conditionnée par l'existence d'une volonté politique (Allemagne, Californie) car l'implantation de ces stations se heurte aux exigences des réglementations de sécurité nationales et aux besoins importants de surfaces nécessaires (environ 10 fois la surface d'une station de distribution d'hydrocarbures).

Comment stocker l'hydrogène?

Pour le stockage à bord du véhicule, la faible masse d'hydrogène stocké par rapport à la masse ou au volume du réservoir nécessaire (quelques pour cent pour l'hydrogène comprimé) handicape son implantation à bord, quelle que soit la forme du stockage envisagé, CGH₂ ou LH₂. Sous forme liquide, l'hydrogène présente l'attrait d'une densité énergétique très supérieure, le réservoir n'est pas sous pression, mais l'isolation thermique nécessaire conduit aussi à un faible rapport entre le

volume d'hydrogène stocké et celui du réservoir. L'évaporation de l'hydrogène pendant les périodes longues de parking pose un problème supplémentaire, obligeant à prévoir soit une combustion catalytique de ces fuites, soit les utiliser dans une pile à combustible pour réinjecter l'énergie électrique produite sur le réseau.

D'autres formes de stockages sont imaginées : solide par fixation chimique réversible de l'hydrogène sur des hydrures ou des nitrures, ou fixation physique par adsorption sur des nanotubes de carbone ou des microsphères de verre. Ces diverses voies se sont révélées décevantes dans les récentes années.

Qu'en pensent les constructeurs automobiles?

La plupart des constructeurs automobiles ont déjà réalisé des démonstrateurs, avec des choix diversifiés de formes de carburant : CGH2 pour General Motors, Daimler, Toyota et d'autres, LH2 pour BMW, ou issu de reformage embarqué pour Renault-Nissan, ou fixé sur hydrures pour PSA, ainsi que de motorisation : à combustion interne pour BMW, ou pile à combustible pour tous les autres.

En ce qui concerne les applications au transport routier et compte tenu de la complexité de son usage, il n'est pas aujourd'hui certain que l'hydrogène pur puisse jouer un rôle important dans l'avenir. Une voie prometteuse pourrait être la synthèse de combustible liquide à partir d'hydrogène légèrement recarboné. Cette voie ferait disparaître les handicaps physiques de l'hydrogène pour les transports terrestres.

Sous cette forme recarbonée liquide, l'avenir de l'hydrogène serait plus facilement assuré, surtout si des moyens de stockage du CO₂ voient le jour, car il permettrait d'utiliser les circuits et moyen techniques de transport et distribution actuels.

Un expert³ envisage pour les 4 Gtep estimés nécessaires aux transports routiers en 2100 le partage suivant entre les carburants: 1/4 pétrole conventionnel et non conventionnel, 1/4 pétrole de synthèse classique à partir de charbon ou gaz, 1/4 hydrogène nucléaire recarboné liquide, 1/4 électrique hybride. L'idée générale est là aussi d'une plus grande variété dans le « bouquet énergétique » par rapport à la solution d'aujourd'hui dominée par les hydrocarbures fossiles.

Les premières applications de l'hydrogène aux transports terrestres concerneront probablement les autobus circulant en ville. Beaucoup de projets sont en cours de réalisation, dont IRISBUS (75 kW PEM FC) fonctionnant à l'hydrogène comprimé à 350 bar, à Paris, Madrid et Turin.

En ce qui concerne les applications au transport aérien, L'hydrogène liquide, déjà utilisé pour la

3. P-R Bauquis, intervention au Congrès européen sur l'Hydrogène Energie, septembre 03.

propulsion des fusées, pourrait-il être le carburant des avions ? Il s'agirait certes d'une niche importante, mais qui reste limitée et encore bien hypothétique.

D'autres applications que le transport ?

Les efforts de développement de l'hydrogène-énergie ne sont-ils pas trop exclusivement orientés vers les transports ? Il y a d'autres usages qui méritent d'y consacrer des moyens et qui pourraient probablement constituer des marchés de transition contribuant à l'avènement de cette encore hypothétique « économie de l'hydrogène » :

- la pétrochimie, par ses besoins de désulfuration des carburants, de développement des filières CTL et BTL, l'amélioration de rendement que peut apporter l'ajout d'hydrogène dans la production des biocarburants ligno-cellulosiques de seconde génération ;
- les réseaux de secours par PAC (pile à combustible) des installations fixes, et les groupes électrogènes mobiles ;
- sans attendre le grand transport, les flottes captives de véhicules utilitaires non polluants (chariot transporteurs-élevateurs, taxis, autobus).

Les freins au développement de l'hydrogène-énergie

Ils sont de plusieurs ordres :

- ◇ la réglementation sécuritaire qui demande une adaptation bien pensée, où le principe de précaution est contraint de faire bon ménage avec le besoin de développement de moyens de transport plus propres ;
- ◇ le coût de production propre (sans émission de CO₂) encore trop élevé de l'hydrogène. Un objectif est d'atteindre 2,5 €/kg ;
- ◇ la lenteur des progrès dans le développement des piles à combustibles, dont l'attrait comme bon convertisseur d'énergie est certain et continue de justifier les efforts consentis. Certes, beaucoup de progrès ont déjà été réalisés, en durée de vie, en masse de platine nécessaire pour les catalyseurs qui a été divisée par trois, voire plus, en coût du système installé qui semble avoir été divisé par 10 depuis les prototypes des années 90, mais selon certains il reste un facteur 8 à réaliser pour atteindre les marchés de transition évoqués plus haut, puis un autre facteur 10 pour gagner le marché du grand transport.

Les budgets énormes actuellement dédiés à ce développement, de l'ordre de 1,3 à 1,4 G€/an au plan mondial, de l'ordre de 200 M€/an en Europe, dont ~135 M€/an en Allemagne et ~45 M€/an en France qui rattrape un certain retard dans ce domaine de recherche.

Il est hasardeux de tenter une conclusion aujourd'hui. On peut toutefois penser que l'accélération actuelle des recherches pourrait permettre un démarrage significatif de l'hydrogène-énergie à partir de 2015.

◇ *Pour en savoir plus sur cette section, voir sur <http://www.academie-technologies.fr> dans «10 questions sur...», «10 questions sur l'hydrogène».*

9.2.3 Le vecteur chaleur

D'une manière générale, la chaleur résulte d'une transformation d'énergie chimique (combustion) ou électromagnétique (solaire thermique) ou cinétique (nucléaire). On cherche dans ces transformations à obtenir une chaleur de la plus haute enthalpie possible (haute température T1), laquelle, mise en communication avec une source froide T2 permet d'extraire une énergie mécanique utilisable soit directement soit pour produire de l'électricité. Mais le principe de Carnot fait qu'une partie seulement de l'énergie thermique de la source chaude T1 peut être transformée en énergie mécanique, dans le rapport $(T1-T2)/T1$, le reste étant dissipé sous forme de **chaleur basse température** à la source froide.

Dans les centrales thermiques et nucléaires dont les puissances électriques sont de l'ordre du GW, l'énergie thermique ainsi perdue par dissipation dans l'eau ou l'air est de l'ordre du double de la puissance électrique, soit environ 2 GW, très au-delà des besoins de chauffage locaux et peut donner le sentiment d'un énorme gâchis.

La cogénération, qui permet de récupérer une partie de cette chaleur pour du chauffage urbain ou des process industriels n'est utilisée que pour des puissances plus réduites, de la dizaine ou la centaine de MW.

La chaleur basse température mérite-t-elle la dénomination de vecteur énergétique ? C'est généralement une forme d'énergie non primaire (mise à part la géothermie) transportable seulement sur de faibles distances, peu stockable, utilisable en un lieu différent de sa production seulement si ce lieu en est assez proche. C'est donc un vecteur assez médiocre, de proximité, dédié surtout au chauffage urbain sous forme de réseau de chaleur.

Les besoins en énergie de chauffage, dont on a vu qu'ils représentent le tiers de l'énergie consommée en France, sont malheureusement des besoins très dispersés sur le territoire. Ce n'est que dans les zones d'habitat très dense que des réseaux de chaleur peuvent s'implanter avec intérêt. Environ 400 réseaux existent dans 350 villes de France, ils couvrent seulement 5 à 6% de l'énergie de chauffage.

Dans les pays à climat froid comme la Russie, les besoins de chauffage s'étendent sur 9 à 10 mois par an ; l'utilisation de chauffage urbain alimentée par des centrales de cogénération au gaz naturel est la solution qui s'impose économiquement.

Des résultats de recherche attrayants laissent espérer la possibilité de transporter la chaleur sur de longues distances (~100 km) avec peu de pertes, notamment par des systèmes à changement de phase. Si ces résultats se confirment et sont économiquement acceptables, ils permettront une avancée significative du vecteur chaleur.

9.3 Les nouvelles utilisations de l'énergie

9.3.1 La production de biocarburants

La valorisation de la biomasse pour produire des biocarburants nécessite de grandes quantités d'énergie. Si on veut obtenir le maximum de biocarburants à partir d'une quantité donnée de biomasse, il faut apporter une énergie extérieure. Une partie au moins de celle-ci, doit être à haute température dans les procédés qui utilisent la matière ligno-cellulosique, ce qui incite à utiliser l'électricité.

9.3.2 La production d'hydrogène

Que ce soit par électrolyse ou par thermochimie, la production et le stockage de l'hydrogène sont gros consommateurs d'énergie (pratiquement 2 tep pour produire 1 tep d'hydrogène). Un développement important de la filière hydrogène nécessiterait donc d'augmenter la consommation d'énergie primaire.

9.3.3 La capture du CO₂

Les procédés de capture du CO₂ sont généralement coûteux en énergie. L'oxycombustion, par exemple, qui permet de n'avoir que très peu d'azote dans les gaz de combustion, nécessite de produire l'oxygène en amont, ce qui augmente la consommation d'énergie primaire d'environ 25 %.

9.3.4 La pile à combustible (PAC)

Une forme nouvelle et attendue de génération d'électricité (et en même temps de chaleur) est la pile à combustible, en utilisation fixe pour l'alimentation électrique et thermique d'immeubles en cogénération, et en utilisation sur véhicule automobile pour l'alimentation électrique de sa motorisation et/ou de ses auxiliaires.

La pile à combustible utilise basiquement l'hydrogène comme carburant, dont la réaction avec l'oxygène de l'air dans un dispositif approprié utilisant généralement un catalyseur et des membranes produit de l'électricité et de la chaleur, avec comme seul résidu non polluant de l'eau, d'où son intérêt majeur pour les transports.

Le coût est le problème essentiel, le niveau actuel étant environ 10 fois trop élevé.

Parmi les objectifs de coûts pour 2010, il était généralement retenu :

- ※ 150 à 200 €/kW pour les transports en commun ;
- ※ 60 €/kW pour les voitures particulières.

En 2008, ces objectifs sont loin d'être atteints.

Le couple H₂/PAC pour les usages fixes semble assez problématique. Le rendement thermodynamique global de la chaîne énergie primaire/transport et stockage de H₂/PAC est en effet très mauvais, et la concurrence du gaz naturel en cycle combiné sera forte. Il faudrait que le coût de l'énergie primaire (verte) servant à produire l'hydrogène soit très bas, que celui des procédés de fabrication de H₂ chute fortement, et que le prix du gaz augmente fortement, pour que ce créneau apparaisse. Si les économies d'énergie et l'utilisation des énergies renouvelables se développent fortement dans le bâtiment, la chaleur dégagée par la pile à combustible verra sa valeur réduite, ce qui handicapera encore plus sa pénétration.

Le cas des usages mobiles peut être différent, la PAC étant alors en concurrence avec le moteur à combustion interne brûlant directement de l'hydrogène, ou un carburant liquide de synthèse dérivé de l'hydrogène.

Le GT « Pile à combustible » a établi l'état de l'art pour les différentes filières de PAC en cours de développement, la palette des puissances possibles, les objectifs d'application, les combustibles utilisables aux étapes successives de l'entrée de ces PAC sur le marché, les bilans énergétiques et l'impact écologique selon ces combustibles.

9.4 Les nouvelles sources d'énergie

- ✖ Le solaire photovoltaïque, sans être véritablement une source nouvelle, pourrait connaître un fort développement si son coût baisse fortement et si on développe des solutions de stockage de grandes quantités d'électricité.
- ✖ La fusion nucléaire contrôlée, pour laquelle l'activité de recherche mondiale centrée sur l'expérience ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) est réactivée depuis la rentrée des Etats-Unis dans le projet en 2003, et par une prise de conscience plus aiguë du risque climatique, pourra-t-elle jouer un rôle dans la seconde moitié du siècle, ou seulement au suivant ? Cette filière par confinement magnétique se situe un peu au-delà de l'horizon de cette analyse. Si les résultats d'essais sur ITER sont favorables, le modèle suivant DEMO, puis le premier réacteur producteur d'électricité PROTO pourraient permettre l'introduction de cette nouvelle filière nucléaire lorsque les premiers réacteurs de génération 4 fonctionneront depuis 40 à 50 ans.
- ✖ L'exploitation des ressources non conventionnelles de méthane, notamment des hydrates de méthane, à long terme, et sous condition que la séquestration des GES soit opérationnelle.
- ✖ L'énergie solaire satellitaire, utopique ? Ou sur un très long terme ?
- ✖ Autre ?

Bibliographie sommaire

◇ Voir en fin des Rapports des GT pour une bibliographie plus extensive

- Beyond Johannesburg : Policies and finance for climate-friendly development. *OECD Development Centre Policy Brief N°21 Rapid global climate change US National Academy of Sciences 2001*
- Changement climatique http://dir.yahoo.com/Society_and_Culture/Environment_and_Nature/Global_Change/Climate_Change/Global_Warming
- Débat national sur les énergies <http://www.debat-energie.gouv.fr>
- Effet des faibles doses de rayonnements ionisants. *Roland Masse*
- Energie 2010-2020, les chemins d'une croissance sobre. *P. Boisson*, Commissariat Général au Plan 1998
- Énergie nucléaire : sortie ou relance? http://www.industrie.gouv.fr/energie/nucleair/se_nuc_cb6.htm
- Energie nucléaire et développement durable. *P. Bernard*
- Energies *Total/finances hors série technologie. Le magazine international*
- Energy Policy and Climate Change *Ph. Jean-Baptiste, R. Ducroux* Energy Policy Elsevier 2003
- Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire *J-M Charpin, B. Dessus, R Pellat* Juillet 2000
- First European Hydrogen Energy Conference http://www.afh2.org/index.php?page=ehc2003_2_texte
- IPCC Special Reports on Climate Change <http://www.grida.no/climate/ipcc/support/order.htm>
- Journée de l'Académie des sciences sur «Energie et climat» [23/04/01]
- La gestion des réseaux électriques *A. Merlin* Conférence à l'Académie des technologies 8 janvier 2002
- La radioactivité naturelle, source de repères. *J. Pradel, D. Beutier, N. Dellero* revue des ingénieurs juin 2002
- La recherche scientifique et technique sur l'énergie. *Rapport N° 8 Académie des sciences 1997*
- Le livre blanc sur les énergies. www.industrie.gouv.fr/energie/politiqu/ploe.htm
- L'effet de serre *H. Le Treut, J-M Jancovici* Flammarion Dominos 2001
- L'énergie de la biomasse. *M. Girard (Académie d'agriculture)* Rapport à l'Académie des technologies 2003
- L'énergie nucléaire civile dans le cadre temporel des changements climatiques. *Robert Daustray* Rapport à l'académie des sciences, décembre 2001
- L'énergie sous toutes ses formes *Ecole d'été de physique 2001* http://e2phy.in2p3.fr/2001/e2phy_2001.html
- L'énergie, édition 2002 *Ministère de l'économie, des finances et de l'industrie*
- Les causes de l'événement Tchernobyl *J. Frot*
- Les économies d'énergie dans l'habitat *J. Orselli SICAT Académie des technologies CE&E*
- Les nouveaux utopistes du développement durable *A-M Ducroux* Autrement, collection mutations 2002
- Les nuisances de l'énergie sur le vivant : influence des faibles doses *A. Syrota*
- Les rayonnements, l'ADN et la cellule *Clefs CEA N° 43 printemps 2000*
- Les recherches pour la gestion des déchets nucléaires *Clefs CEA N° 46 printemps 2002*
- L'état actuel et les perspectives des énergies renouvelables *C. Birraux, J-Y Le Déaut* Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Assemblée nationale et Sénat 2001

- Livre vert de la Commission européenne
- Maîtrise de l'énergie *CD Rom ADEME 2003 débat national sur les énergies*
- Meeting the energy challenges of the 21st century *Pierre Bacher Int. journal of En. Techn. and Policy 2002*
- Mémento sur l'énergie *CEA*
- Méthodologie des problèmes de l'énergie *P. Caseau Présentation à l'Académie des technologies 2003*
- Moi, U²³⁵ atome radioactif *B. Bonin, E. Klein, J-M Cavedon Flammarion 2001*
- Nouvelles technologies de l'énergie *Clefs CEA N° 44 hiver 2000/2001*
- Physique nucléaire et sûreté *Clefs CEA N° 45 automne 2001*
- Primary energy needs and greenhouse effect increase : what can be done? *J-M Loiseaux International journal of Energy Technology and Policy 2002*
- Quel avenir pour le nucléaire? *Passages oct.nov. 2003*
- Quel avenir pour les combustibles fossiles? *B. Tissot Académie des Sciences – 23 avril 2001*
- Quelle énergie pour demain? *Pierre Bacher Nucléon 2000*
- Quelles énergies pour les transports *A. Douaud Conférence à l'Académie des technologies 13 mai 2003*
- Radiations ionisantes *Y-S Cordoliani Cours du Service de santé des armées Val-de-Grâce*
- Radiologie et radioprotection *M. Tubiana et J. Lallemand Que sais-je? PUF 2002*
- Rapport à Monsieur le Président de la République, *Académie des sciences+CADAS janvier 2000*
- Rapport du GT « Gaz naturel » *SICAT Académie des technologies CE&E (voir bibliographie dans ces rapports)*
- Rapport du GT « Le charbon, quel avenir? » *SICAT Académie des technologies CE&E (idem)*
- Rapport du GT « Les filières nucléaires d'aujourd'hui et de demain » *SICAT Académie des technologies CE&E*
- Rapport du GT « Que peut-on faire contre le CO2 ? » *SICAT Académie des technologies CE&E (idem)*
- Rapport du GT « Les économies d'énergie » *SICAT Académie des technologies CE&E (idem)*
- Rapport du GT « Les énergies renouvelables » *SICAT Académie des technologies CE&E (idem)*
- Statistical review of world energy *BPamoco june 2000*
- Tchernobyl : Quelles conséquences sanitaires? *A. Aurengo Le dossier du nucléaire*
- The Nuclear Accident at Three Mile Island <http://www.tmia.com/79acc.htm>
- Traité des nouveaux risques *O. Godard, C. Henry, P. Lagadec, E. Michel-Kerjan Gallimard folio actuel 2002*
- Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050 *P-R Bauquis.*

Académie des technologies
 Grand Palais des Champs-Élysées
 Avenue Franklin D. Roosevelt
 Adresse postale : Porte C, 75008 Paris
 Entrée visiteurs : Palais de la découverte
 tél : 01 53 85 44 44 – fax : 01 53 85 44 45
www.academie-technologies.fr

Imprimé en Europe