

N° 3197

ASSEMBLÉE NATIONALE

CONSTITUTION DU 4 OCTOBRE 1958

DOUZIÈME LÉGISLATURE

N° 426

SÉNAT

SESSION ORDINAIRE DE 2005-2006

Enregistré à la Présidence de l'Assemblée nationale
le 28 juin 2006

Annexe au procès-verbal de la séance
du 27 juin 2006

OFFICE PARLEMENTAIRE D'ÉVALUATION
DES CHOIX SCIENTIFIQUES ET TECHNOLOGIQUES

RAPPORT

sur

« Les apports de la science et de la technologie au développement durable »

Tome I :

« Changement climatique et transition énergétique : dépasser la crise »

Par MM. Pierre LAFFITTE et Claude SAUNIER,
Sénateurs.

Déposé sur le Bureau de l'Assemblée nationale
par M. Claude BIRRAUX

Premier Vice-Président de l'Office.

Déposé sur le Bureau du Sénat
par M. Henri REVOL

Président de l'Office.

*Composition de l'Office parlementaire d'évaluation
des choix scientifiques et technologiques*

Président

M. Henri REVOL

Premier Vice-Président

M. Claude BIRRAUX

Vice-Présidents

M. Claude GATIGNOL, député

M. Jean-Claude ETIENNE, sénateur

M. Pierre LASBORDES, député

M. Pierre LAFFITTE, sénateur

M. Jean-Yves LE DÉAUT, député

M. Claude SAUNIER, sénateur

Députés

Sénateurs

M. Jean BARDET

M. Philippe ARNAUD

M. Christian BATAILLE

M. Paul BLANC

M. Claude BIRRAUX

Mme Marie-Christine BLANDIN

M. Jean-Pierre BRARD

Mme Brigitte BOUT

M. Christian CABAL

M. Marcel-Pierre CLÉACH

M. Alain CLAEYS

M. Roland COURTEAU

M. Pierre COHEN

M. Jean-Claude ETIENNE

M. Francis DELATTRE

M. Christian GAUDIN

M. Jean-Marie DEMANGE

M. Pierre LAFFITTE

M. Jean DIONIS du SÉJOUR

M. Serge LAGAUCHE

M. Jean-Pierre DOOR

M. Jean-François LE GRAND

M. Pierre-Louis FAGNIEZ

Mme Catherine PROCACCIA

M. Claude GATIGNOL

M. Daniel RAOUL

M. Louis GUÉDON

M. Ivan RENAR

M. Christian KERT

M. Henri REVOL

M. Pierre LASBORDES

M. Claude SAUNIER

M. Jean-Yves LE DÉAUT

M. Bruno SIDO

M. Pierre-André PÉRISSOL

M. Alain VASSELLE

« L'homme, par son égoïsme trop peu clairvoyant pour ses propres intérêts, par son penchant à jouir de tout ce qui est à sa disposition, en un mot, par son insouciance pour l'avenir et pour ses semblables, semble travailler à l'anéantissement des moyens de conservation et à la destruction même de sa propre espèce... »

Lamarck - 1820

SOMMAIRE

	<u>Pages</u>
AVANT-PROPOS	9
INTRODUCTION	11
PREMIÈRE PARTIE : LE MODÈLE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL : ÉTAT ET PERSPECTIVES	17
I. LE CHANGEMENT DU CLIMAT : UNE RÉALITÉ TRÈS INQUIÉTANTE	18
A. LES CONSTATS DE BASE	18
1. <i>La mécanique du système climatique</i>	19
2. <i>L'origine anthropique du changement climatique</i>	21
B. LES INTERROGATIONS SUR L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME CLIMATIQUE	22
1. <i>La « facture climatique » de l'économie mondiale</i>	22
2. <i>La physique du climat</i>	23
a) <i>La vitesse acquise</i>	23
b) <i>Les évolutions en cas de poursuite de la croissance des émissions de gaz à effet de serre</i>	24
(1) <i>Les risques d'emballement du système</i>	25
(2) <i>La dissymétrie des phénomènes climatiques</i>	25
(3) <i>L'éventualité d'un dérèglement climatique profond</i>	26
C. LES CONSÉQUENCES	27
1. <i>Des effets physiques certains mais pas toujours perceptibles</i>	27
2. <i>Des effets financiers déjà quantifiables</i>	28
a) <i>Le coût actuel des changements climatiques</i>	28
b) <i>Les prévisions</i>	29
II. LA NÉCESSITÉ DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	31
A. LA CERTITUDE D'UNE RARÉFACTION DE L'OFFRE DE MATIÈRES PREMIÈRES ÉNERGÉTIQUES	31
1. <i>Le pétrole</i>	32
a) <i>L'évaluation des réserves de pétrole : des données évolutives en fonction des technologies et de l'économie</i>	32
(1) <i>Les réserves prouvées</i>	32
(2) <i>Les réserves de gisements encore à découvrir</i>	33
(3) <i>Les réserves en pétrole non conventionnel</i>	33
(4) <i>Les ressources offertes par l'amélioration de la récupération</i>	34
b) <i>Quelle est la disponibilité effective de ces réserves ?</i>	34
2. <i>Le gaz naturel</i>	35
a) <i>Les réserves prouvées (90 % de probabilités d'extraction), probables (50 % de probabilités d'extraction) et possibles (10 % de probabilités d'extraction)</i>	35
b) <i>Les réserves estimées</i>	35
c) <i>Les améliorations d'exploration et d'exploitation</i>	35
3. <i>L'uranium</i>	35
4. <i>Le charbon</i>	36

B. LES FACTEURS ANTHROPIQUES D'ÉVOLUTION DE LA DEMANDE	37
1. <i>La démographie brute</i>	39
a) Une inflexion démographique	39
b) Une population mondiale en accroissement	39
c) Des interrogations	40
(1) L'urbanisation	40
(2) Le vieillissement de la population	41
2. <i>L'essor de l'économie de marché mondialisée</i>	42
a) Le poids relatif des hommes	42
(1) Le comblement progressif du fossé Est-Ouest	43
(a) <i>La Chine</i>	43
(b) <i>L'Union indienne</i>	44
(2) Le maintien d'une forte demande énergétique en Amérique du Nord	45
(3) L'aggravation de la fracture Nord-Sud	46
b) L'étendue des espaces	47
c) Mécanismes de régulation de l'économie de marché mondialisée	48
(1) L'autonomie croissante vis-à-vis des politiques	48
(2) Des traits dominants qui entravent la mise en place d'un développement durable	49
(a) <i>La logique du marché</i>	49
(b) <i>La logique financière</i>	49
(c) <i>La logique des allocations de facteurs</i>	50
d) Un miracle de la « main invisible » du marché ?	50
e) La réintroduction des déséconomies externes dans le processus économique	51
f) Les interrogations sur les conséquences de la rupture technologique numérique	53
g) Des horizons temporels différents	54
(1) L'urgence de réhabiliter les temps longs	54
(2) L'orchestration des constantes de temps divergentes	54
(a) <i>Les rythmes de la biosphère</i>	55
(b) <i>Les progrès technologiques</i>	55
(c) <i>L'économie de marché</i>	56
(d) <i>Les comportements sociaux</i>	56
DEUXIÈME PARTIE : LES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES D'ICI 2030	59
I. LES VARIABLES DÉTERMINANTES	60
A. L'APPROCHE DU PIC PÉTROLIER	60
1. <i>Les données du problème</i>	60
2. <i>Vers un pétrole à 150 dollars le baril ou plus</i>	61
a) L'offre	62
b) La demande	63
c) Des effets de prix dévastateurs	65
(1) Les mécanismes	65
(2) Les conséquences	67
B. L'AMPLEUR ET LA PRÉCOCITÉ DES RÉPONSES POLITIQUES	68
1. <i>Les réponses nationales</i>	68
2. <i>Les réponses internationales</i>	69
II. LES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES D'ICI 2030	72
A. LA POURSUITE DE LA TENDANCE OU LA PERSPECTIVE DU PIRE	73
1. <i>Une partition accentuée des économies et des sociétés mondiales</i>	73
2. <i>Le renforcement des tensions</i>	74
a) Sur le plan interne	74
b) A l'échelon international	75

B. LA POSSIBILITÉ D'UNE RÉTRACTATION DE L'ÉCONOMIE MONDIALE	75
1. <i>Le rôle et la configuration du transport</i>	76
2. <i>Le bouclage économique et financier du système</i>	77
C. LA RÉUSSITE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE.....	77
TROISIÈME PARTIE :	81
L'APPORT DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	81
I. LA MULTIPLICITÉ DE L'OFFRE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE	84
A. LES DONNÉES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE.....	85
1. <i>La consommation mondiale d'énergie primaire</i>	85
a) La consommation globale	85
b) Les émissions de CO ₂ par type d'usage	86
2. <i>Le cas de la France</i>	87
B. LES RÉPONSES DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE	88
1. <i>Les propositions relatives à la production d'énergie</i>	88
a) Les objectifs	88
b) La rénovation des filières émettrices de gaz à effet de serre	91
(1) La cogénération par cycle combiné à gaz	91
(2) La rénovation de la filière charbon	92
(a) <i>L'amélioration des centrales classiques</i>	92
(b) <i>La captation-séquestration du CO₂</i>	93
c) Les filières électronucléaires.....	94
d) Les énergies renouvelables	96
(1) Caractéristiques des énergies renouvelables.....	96
(a) <i>Les caractéristiques positives</i>	96
(b) <i>Les caractéristiques négatives</i>	97
(2) La géothermie.....	99
(3) L'éolien	99
(4) L'hydraulien.....	100
(5) L'énergie solaire	100
(a) <i>L'énergie solaire thermodynamique</i>	100
(b) <i>L'énergie solaire photovoltaïque</i>	100
2. <i>Les propositions concernant les usages de l'énergie</i>	102
a) Les données stratégiques.....	102
(1) par énergie finale :	103
(2) par secteurs de consommation :	103
b) Le résidentiel tertiaire.....	104
(1) L'évolution générale des consommations	104
(2) Les usages thermiques et frigorifiques	106
(3) La consommation d'électricité	108
(a) <i>Les consommations d'électricité spécifiques</i>	108
(b) <i>L'éclairage</i>	110
c) Les transports	111
(1) Un fort accroissement des besoins en combustibles fossiles.....	111
(2) Le transport routier.....	113
(a) <i>Les limites des transferts modaux</i>	113
(b) <i>La réduction des consommations unitaires des véhicules</i>	114
(i) <i>Le bridage des véhicules</i>	114
(ii) <i>L'amélioration des rendements des moteurs classiques</i>	115
(c) <i>L'hybridation</i>	116

(d) Les biocarburants	117
(e) Les carburants de synthèse.....	122
(f) Les filières alternatives.....	122
(i) La voiture électrique.....	123
(ii) La filière hydrogène	124
(3) Le transport aérien	130
3. L'impact des technologies transversales	133
a) Les nouvelles technologies de l'information et de la communication.....	133
(1) Vers de nouveaux usages sociaux	134
(2) L'optimisation des réactions de l'infiniment petit.....	134
b) La conversion thermique	135
c) La distribution de l'électricité.....	135
(1) La conversion	135
(2) Les réseaux de distribution	136
d) Le stockage de l'électricité	136
II. LES PROBLÈMES LIÉS À L'INTRODUCTION DES FILIÈRES DE SUBSTITUTION.....	138
A. DES ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES EXTÉRIEURS.....	138
1. Les prix et l'accessibilité du pétrole et du gaz naturel	138
2. La réussite des tentatives d'incorporer le changement climatique dans le calcul économique.....	138
a) Les politiques nationales.....	139
b) L'action internationale.....	139
(1) La poursuite du cycle de Kyoto	139
(2) Les règles de l'OMC.....	140
B. DES ÉLÉMENTS LIÉS À L'INFLEXION DES COMPORTEMENTS SOCIAUX	140
1. La psychologie collective	141
2. Les choix individuels.....	142
C. DES ÉLÉMENTS INTRINSÈQUES À CHAQUE TECHNOLOGIE	142
1. Les filières qui approchent d'une maturité technologique et côtoient la rentabilité économique.....	143
2. Les filières dont l'introduction économique est assurée, mais dont la maturité technologique est plus lointaine	143
3. Les filières approchant de la maturité technologique, mais dont l'introduction dépend de conditions économiques extérieures	143
4. Les filières qui ne sont mûres ni technologiquement ni économiquement	144
III. UNE CHANCE ÉCONOMIQUE À SAISIR.....	145
CONCLUSION GÉNÉRALE.....	147
QUATRIÈME PARTIE : DIX PROPOSITIONS POUR RÉUSSIR LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	149
I. MIEUX CONNAÎTRE LES EFFETS RÉELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE.....	150
A. L'INTENSIFICATION DES PROGRAMMES SATELLITAIRES D'OBSERVATION.....	150
B. LA CRÉATION D'UNE PLATE-FORME MONDIALE DE CALCUL	150

C. RENFORCER L'ANALYSE DU COÛT EFFECTIF ET PRÉVISIBLE DES DÉGÂTS LIÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE	151
II. RÉINSÉRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES MÉCANISMES DE L'ÉCONOMIE MONDIALE	152
III. FAIRE DE L'EUROPE UN ACTEUR CONCRET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	154
A. LA LABELLISATION CARBONE.....	155
B. LA CRÉATION D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EUROPÉENNES LIÉES AU DÉVELOPPEMENT DURABLE	155
1. <i>La création d'une fiscalité européenne dédiée au développement durable</i>	155
2. <i>Le ferroutage</i>	156
3. <i>La filière hydrogène</i>	156
IV. FAIRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE UNE PRIORITÉ NATIONALE	158
A. AFFICHER LES ÉCHÉANCES D'UN PLAN DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE	160
B. « BALAYER », DANS LES DOMAINES DIRECTEURS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, LA LÉGISLATION QUE SONT L'URBANISME ET LES TRANSPORTS	161
C. INFORMER LES CITOYENS.....	161
1. <i>La sensibilisation générale</i>	161
2. <i>L'information concrète</i>	162
V. ENCOURAGER LE DÉVELOPPEMENT DES FILIERES ALTERNATIVES À LA CONSOMMATION D'HYDROCARBURES FOSSILES.....	163
VI. REMETTRE EN ORDRE LE DISPOSITIF FISCAL POUR ASSURER DES FINANCEMENTS COMPLÉMENTAIRES.....	165
VII. MENER UNE ACTION SPÉCIFIQUE DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS.....	169
A. UTILISER LA FISCALITÉ ET LA NORMALISATION	169
1. <i>La normalisation</i>	169
2. <i>La fiscalité</i>	170
B. ACTIVER LES EXPÉRIMENTATIONS INFLÉCHISSANT LA PRATIQUE SOCIALE DE L'AUTOMOBILE	171
VIII. RENFORCER L'ACTION MENÉE DANS LE SECTEUR RÉSIDENTIEL-TERTIAIRE	172
A. LE BÂTIMENT.....	173
1. <i>Mettre le développement durable au cœur de l'action de l'État</i>	173
2. <i>Planifier la réglementation thermique à long terme</i>	174
3. <i>Utiliser la réglementation thermique pour un urbanisme plus durable</i>	174
4. <i>Structurer l'offre de bâtiments plus efficaces énergétiquement</i>	175
5. <i>Clarifier les conditions d'attribution des certificats d'efficacité énergétiques</i>	175
6. <i>Activer la demande de rénovation du parc existant</i>	176
a) <i>Créer de nouveaux instruments bancaires</i>	176
b) <i>Amplifier l'incitation fiscale</i>	176

B. RENFORCER LES NORMES SUR LES CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITÉ SPÉCIFIQUES.....	177
IX. IMPLIQUER FORTEMENT LES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES.....	178
1. Inclure le développement durable dans les contrats de Plan État-Régions.....	179
2. Moduler les dotations d'équipement et de fonctionnement au regard des politiques de lutte contre l'effet de serre menées par les collectivités	179
3. Proposer des bonifications d'intérêt aux investissements des collectivités effectués dans le domaine de la lutte contre l'effet de serre.....	179
X. PRÉPARER L'APRÈS 2030.....	180
1. Les nanotechnologies et la modélisation de l'infiniment petit	180
2. La fission nucléaire de génération IV.....	180
3. La filière hydrogène	181
4. La fusion nucléaire	181
ANNEXES	183
ANNEXE N° 1 : ADOPTION PAR L'OFFICE.....	185
ANNEXE N° 2 : LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES	187
I. PERSONNES AUDITIONNÉES EN FRANCE.....	187
II. PERSONNES AUDITIONNÉES AUX ETATS-UNIS	194
III. PERSONNES AUDITIONNÉES EN ALLEMAGNE.....	198
IV. PERSONNES AUDITIONNÉES À LA COMMISSION EUROPÉENNE.....	200
V. PERSONNES AUDITIONNÉES EN CHINE.....	201

AVANT-PROPOS

L'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a été saisi, par le Bureau du Sénat, d'une demande d'étude sur « *Les apports des sciences et des technologies au développement durable* ».

L'étude de faisabilité de cette saisine, présentée le 22 juin 2005, a permis de prendre conscience de l'ampleur du sujet et, par suite, de scinder son exposé en deux parties :

- Tome I : « *Changement climatique, transition énergétique : dépasser la crise* »,
et
- Tome II : « *La préservation de la biodiversité et les nouvelles transformations industrielles* ».

Le présent rapport traite donc uniquement du développement durable sous l'**angle de l'organisation de la transition énergétique de nos sociétés.**

INTRODUCTION

Le développement durable : un concept à recentrer

C'est en 1987 que la Présidente de la Commission mondiale sur l'environnement, Mme Bruntland – qui était à l'époque Premier ministre de Norvège – a défini le développement durable comme « *un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures de répondre aux leurs* ».

Mais, au fil du temps, l'acception du concept de développement durable, dont la définition était claire à l'origine, a peu à peu incorporé des adjonctions comme la protection généralisée de l'environnement.

Si certaines composantes de cette protection sont directement connexes au développement durable (comme la préservation de la ressource en eau et de la biodiversité ou les conséquences de l'effet de serre), d'autres en paraissent plus éloignées.

En raison d'accidents majeurs comme les pluies acides, l'accident nucléaire à Tchernobyl, les trous dans la couche d'ozone, la déforestation et l'ESB, l'idée s'est fait jour, dans une large partie de l'opinion publique, que le développement durable s'identifiait à une protection de l'environnement.

Cette confusion des genres opposant nature et culture, l'homme et son environnement, est particulièrement malencontreuse. La notion de développement durable, dans sa définition initiale, posait les termes d'un débat fort sur la coexistence de l'homme, à un stade donné de son développement, et de sa biosphère. Cette approche constituait une ouverture conceptuelle forte et inédite.

Il sera donc utile de restituer au développement durable ce qui doit être sa vraie dimension, celle de l'homme ; en unifiant et non en opposant, comme on le fait trop souvent et trop abusivement, la durabilité au développement.

En d'autres termes, il s'agit de déterminer comment l'homme pourra utiliser de mieux en mieux des ressources qui sont de plus en plus rares, tout en s'assurant que cet emploi soit aussi neutre que possible pour la préservation des équilibres de la biosphère.

Réhabiliter la science

La série de dérapages technologiques des vingt dernières années a abouti, sinon à un rejet, du moins à une méfiance vis-à-vis du progrès scientifique.

Au-delà des dévoiements technologiques précités, les raisons de cette méfiance sont multiples.

Au premier rang d'entre elles, l'**absence de démocratisation de la culture scientifique**. Confinée dans les milieux scolaire et universitaire, **la culture scientifique peine à accéder aux grands moyens télévisuels de diffusion** : l'imperium de l'image, le caractère immédiat et fugace de l'information qu'ils délivrent n'est pas propice à des développements sur les avancées scientifiques et à l'acquisition d'une véritable culture.

Cette défiance est aussi entretenue par une évolution assez récente. Dans un monde qui devient économiquement plus incertain, la conscience collective s'accommode de moins en moins d'autres risques sociaux. Moins contestable dans son essence que dans son application, le fameux principe de précaution a une conséquence directe : il renforce **la judiciarisation de la société et multiplie à l'excès les garde-fous juridiques. Vis-à-vis de la science, cette attitude n'est pas neutre : elle est porteuse d'un conservatisme des esprits et des pratiques qui identifie tout progrès à un facteur de risques.**

Cette mécanique sociale faite de sous-information et de réticences psychologiques est d'autant plus malvenue que les avancées de la science et de la technologie sont les voies les plus incontestables pour nous assurer une durabilité de développement.

Ainsi, en matière de constat, ce sont les progrès en continu de l'observation satellitaire de la Terre, de la glaciologie, de la dendroclimatologie, de la microélectronique et de la modélisation qui nous ont permis de prendre conscience du réchauffement climatique puis de qualifier le caractère largement anthropique de son origine.

Ce sont d'autres progrès scientifiques et technologiques qui nous permettront de faire face à une partie de la transition énergétique qui s'annonce.

La nécessité de la transition énergétique

La conscience des problèmes posés par la confrontation d'un monde fini et d'une humanité dont le nombre croît et les besoins augmentent n'est pas nouvelle.

Il y a deux siècles, les anticipations pessimistes de Malthus reposaient déjà sur la mise en parallèle de ressources alimentaires apparemment limitées par la disponibilité en terrains agricoles et la croissance observée de la population.

Plus proches de nous, les travaux du Club de Rome publiés en 1971 (« Halte à la croissance ») ont renouvelé l'objet, sinon les termes, du débat.

Prenant acte du déséquilibre prévisionnel qui semblait s'établir à un horizon de trente ans entre des ressources naturelles vouées à un épuisement progressif et les besoins en matières premières liés à l'expansion économique et à la croissance démographique, le **Club de Rome prônait, alors, la croissance zéro.**

Si les accents, presque millénaristes, des modélisateurs du Club de Rome ont été jusqu'ici démentis par les faits, les termes de l'équation de base d'une réflexion sur le développement durable y avaient été clairement posés.

Aujourd'hui, la **nécessité d'une transition énergétique** entre un monde dont l'économie et l'organisation sociale étaient assises sur l'utilisation sans frein de ressources énergétiques abondantes et bon marché et un monde contraint de ménager des ressources **commence à poindre.**

Des échéances qui se précisent

Les premières années du 21^e siècle ont apporté à ce débat **une dimension nouvelle : celle d'une perception de l'accélération des échéances.**

Ceci principalement sur deux points : le caractère inéluctable du changement climatique et la prise de conscience plus aiguë d'une limitation des ressources mondiales en hydrocarbures.

Le rapport du Groupe international d'experts sur le climat (GIEC) publié en octobre 2001 a établi, de façon peu contestable, à la fois la responsabilité de l'homme dans le changement climatique et le caractère irréfragable de celui-ci, quelles que puissent être les mesures qui seraient à prendre et que nous ne prenons pas, ou très insuffisamment.

Les tensions continues enregistrées depuis deux ans sur les prix du pétrole ont, par ailleurs, fourni la démonstration explicite qu'une ressource que l'on estimait disponible et à bon marché, à vue de deux générations, ne le serait probablement pas.

Ces événements devraient appeler notre attention sur les menaces qu'impliqueraient, pour notre système d'organisation sociale et économique, les changements climatiques, la raréfaction accélérée des ressources naturelles énergétiques utilisées pour l'industrie, les transports des hommes et des marchandises et le chauffage.

Toutefois, on note que ni les événements climatiques, ni la hausse du prix des carburants n'ont, jusqu'ici, empêché la croissance mondiale de se poursuivre. **Jusqu'ici mais jusqu'à quand ?**

La faiblesse des réactions des acteurs décisionnels de la société face à ces événements apporte la preuve que des événements plus graves sont nécessaires pour infléchir les pratiques économiques et sociales à la hauteur des enjeux en cause.

Or, le temps presse.

Un thème très débattu

La perception des enjeux du développement durable a eu pour conséquence la récurrence récente du traitement de ce thème aussi bien dans l'édition et les médias que dans les instances ministérielles ou dans les travaux parlementaires.

Face à cette multiplication de prises de position et d'analyses sectorielles, généralement de qualité, et afin d'éviter des redondances inutiles, le traitement des questions liées à un usage de l'énergie adapté à un développement plus durable **doit s'inspirer d'une approche à la fois plus synthétique et plus prospective.**

Il faut opérer une synthèse rigoureuse de l'état actuel du modèle énergétique de la planète, développer une vision claire des enjeux réels et de leurs évolutions, ainsi qu'une compréhension des enjeux tant géopolitiques que techniques, ceci en tenant compte des volumes financiers et des durées qu'impliquent tout changement important dans le domaine des usages des énergies fossiles et dans la lutte contre les effets des dérèglements climatiques.

*

* *

C'est pourquoi cette étude :

- rappelle l'état et les perspectives du **modèle énergétique mondiale** et des effets du **changement climatique**,
- expose les scénarios envisageables d'ici 2030,
- analyse les apports de la science et des techniques en vue de faciliter l'indispensable **transition énergétique**,
- et propose des **solutions politiques** pour faciliter cette transition.

PREMIÈRE PARTIE :
LE MODÈLE ÉNERGÉTIQUE MONDIAL :
ÉTAT ET PERSPECTIVES

Une certitude s'installe progressivement : il nous sera de plus en plus difficile de continuer à fonder notre développement économique sur un modèle énergétique qui présuppose l'utilisation sans frein de sources d'énergie fossile abondantes et bon marché.

Mais on ne peut traiter des problèmes liés au modèle énergétique mondial actuel comme on l'aurait fait à l'occasion des crises pétrolières de 1973 et 1980. **Car la Terre est à la fois un espace de vie et une réserve de ressources.**

La menace sur cet espace de vie, déjà pressentie par Lamarck en 1820, est devenue incontournable : le changement climatique. Ce phénomène majeur, d'ampleur historique, que les scientifiques mesurent avec plus d'acuité depuis le milieu des années 1980 est d'origine fortement anthropique ; il est une des conséquences directes de nos modes d'utilisation des ressources énergétiques. Cette menace est désormais ressentie comme aiguë par la quasi-totalité des scientifiques mondiaux.

D'autant plus que l'inertie des systèmes fait que le redressement de la tendance ne peut relever que de durées très longues, ce qui doit appeler à une action aussi rapide que possible.

Mais il peut se faire aussi que la prise de conscience de la nécessité de cette action et de la mise en œuvre de la transition énergétique soit accélérée par la confrontation d'une offre de sources d'énergies primaires qui se raréfient et d'une demande dont on voit mal les courbes de croissance s'infléchir d'ici une génération.

I. LE CHANGEMENT DU CLIMAT : UNE RÉALITÉ TRÈS INQUIÉTANTE

En parallèle à la mondialisation de l'économie de marché, une mondialisation plus discrète, celle des problématiques environnementales s'est esquissée. Ce mouvement, amorcé à l'occasion de la lutte contre les CFC, s'incarne dans la communauté scientifique internationale.

Il existe aujourd'hui, autour du groupe international d'experts sur le changement climatique (GIEC), une conscience mondiale commune des problèmes liés au changement climatique, ainsi que de leurs objets et de leurs instruments d'étude.

Les progrès accomplis par la science, en particulier dans le domaine de l'espace, des outils de mesure, de la puissance de calcul et de la modélisation ont abouti à une métrologie pratiquement en temps réel des données physiques de la biosphère qui permet d'en modéliser les évolutions.

Cette modélisation requiert une puissance de calcul croissante ce qui va poser à terme le problème de la mise en ligne à l'échelon mondial des calculateurs de plus en plus coûteux qu'elle requiert.

Elle devient, parallèlement, de plus en plus efficace car elle est corrigée régulièrement par la comparaison entre les prévisions antérieures et les observations d'évolution constatées.

En l'état, une vingtaine d'années de travaux scientifiques certains sur le changement climatique :

- autorise à établir un double constat sur les origines anthropiques du réchauffement climatique et sur le caractère incontournable du phénomène,
- soulève des interrogations sur l'évolution du système climatique de la planète,
- et permet d'en esquisser les conséquences.

A. LES CONSTATS DE BASE

En 1990, le premier rapport du GIEC était prudent, tant sur les causes que sur l'ampleur du changement climatique.

Le rapport de 1995 a marqué des progrès dans les réponses à ces deux questions.

Le dernier rapport, publié en 2001, est plus affirmatif : les retours d'information sur la mécanique du système climatique établissent sans conteste que **ce réchauffement va se poursuivre d'ici 2100 et qu'il est très largement d'origine anthropique.**

1. La mécanique du système climatique

Les rayons du soleil et, pour une moindre part, la radioactivité naturelle sont des facteurs d'échauffement. La radiation de la terre vers l'espace est un facteur de refroidissement. L'équilibre thermique, entre ces variables contraires, s'établirait à -18°C s'il n'y avait pas de gaz tels que la vapeur d'eau, le gaz carbonique et d'autres.

Les gaz à effet de serre (GES), dont les plus importants sont la vapeur d'eau, le gaz carbonique, le méthane et le protoxyde d'azote, absorbent une part de cette radiation de la terre vers l'espace et contribuent à réchauffer l'atmosphère.

Le pouvoir de réchauffement global (PRG) de chacun de ces gaz est défini par un indice qui combine leur efficacité énergétique à absorber les rayonnements et leur temps de résidence dans l'atmosphère

Pour un indice PRG de 1, qui est celui du gaz carbonique :

- celui du méthane est de 23,
- et celui du protoxyde d'azote est de 296.

De 1750 à 2000, les contributions de ces gaz à l'effet de serre ont été de 60 % pour le gaz carbonique et de 20 % pour le méthane.

Mais :

- le méthane s'oxyde naturellement en gaz carbonique au terme de son temps de résidence,
- et la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère par rapport au méthane est 216 fois plus forte (368 parties par million contre 1,7 partie par million).

De ce fait, l'examen de la problématique du changement climatique s'identifie très largement à celle du cycle du carbone dans notre biosphère.

Quarante-six pour cent du gaz carbonique émis reste dans l'atmosphère, le reste est capté à part égale par la biomasse et les océans.

L'atmosphère échange le carbone avec les réservoirs naturels que sont la biomasse et les océans (les autres réservoirs naturels que sont les sédiments marins et les roches ne participent à cet échange que sur des échelles de temps géologiques).

La végétation absorbe le carbone par photosynthèse (et le restitue plus lentement par décomposition – ou plus brutalement par incendie).

Dans l'océan, outre la biomasse marine qui agit par photosynthèse, une grande partie du carbone est captée sous forme de CO_2 dissous, pour l'essentiel sous formes d'ions CO_3 .

Le réchauffement est néfaste pour l'intensité de cette absorption car les eaux froides dissolvent plus rapidement le CO₂ que l'eau plus chaude.

La situation de chacun de ces trois puits de carbone, qui sont autant de réservoirs, s'établit comme suit :

- 775 milliards de tonnes dans l'atmosphère,
- 2 190 milliards de tonnes dans la biomasse terrestre,
- 1 030 milliards de tonnes à la surface des océans,
- et 38 100 milliards de tonnes au fond des océans.

Une des caractéristiques de cette mécanique complexe qu'est le climat sur terre est qu'**elle est très sensible aux variations**. On estime qu'il suffit d'une émission supplémentaire de 1 % de gaz carbonique (c'est-à-dire 7,4 milliards de tonnes sur 775 milliards de tonnes présentes dans l'atmosphère) pour que les interrelations du système évoluent.

Une autre caractéristique est son **inertie** :

• Les **gaz à effet de serre** qui commandent pour partie le réchauffement ont des temps de résidence longs :

- 120 ans pour le gaz carbonique,
- 8 à 13 ans pour le méthane,
- 296 ans pour le protoxyde d'azote.

• Les **océans** qui ont un rôle directeur¹ sur l'état du climat constituent une masse très inerte. Depuis 1870, la température des océans n'a varié que de 0,05° C à 0,1° C (contre 0,6° C à ± 0,2° C pour la température de l'air). Cette inertie thermique continuera à contribuer au réchauffement pendant au moins plusieurs générations même si l'on stabilise les émissions de CO₂ dans l'atmosphère.

D'où ce **constat brut, mais incontestable**, qu'a établi en 2001 le rapport du GIEC :

- d'ici 2100, la température sur terre augmentera de 1,4° C à 5,8° C (soit 2 à 9 fois plus que l'augmentation enregistrée au 20^e siècle),
- d'ici 2100, le niveau des mers s'élèvera de 10 à 90 cm ;

Relevons que ces fourchettes assez larges s'expliquent à la fois par des incertitudes relevant des rythmes d'évolution propre au système climatique et du poids de l'intervention humaine pendant le prochain siècle. A cet égard, nous verrons que la plupart des rapports sous-estiment fortement le développement économique de la zone asiatique amorcé ces dernières années.

¹ Par exemple, on a observé sur des séries climatiques passées que des variations de circulation océanique pouvaient augmenter la température de 10° C à certains endroits de la planète.

2. L'origine anthropique du changement climatique

Les modèles développés par le GIEC établissent que les phénomènes naturels (volcanisme, activité solaire) ne rendent pas compte du réchauffement de la planète depuis 1850 et qui s'accélère depuis une trentaine d'années. **Les causes de ce réchauffement sont donc principalement anthropiques.**

Ce que les experts résument en exposant que l'activité humaine est source d'émissions de gaz à effet de serre de l'ordre de $2,5 \text{ w/m}^2$ (+ $0,5 \text{ w/m}^2$ d'ozone troposphérique), ce qui correspond à l'**équivalent de la chaleur créée par une lampe de poche allumée sur chaque m^2 de la planète.**

Ce constat est supporté par la plus grande partie de la communauté scientifique internationale. Mais celle-ci estime qu'il peut être **rectifié à la marge.**

D'une part, les modélisations actuelles doivent être resituées dans l'histoire climatique « récente » de la Terre :

- les années 1850, à compter desquelles on observe le réchauffement, sont aussi celles qui ont enregistré la fin du petit âge glaciaire. Il y aurait donc un réchauffement climatique naturel à côté du réchauffement anthropique ;
- le fait que le réchauffement enregistré depuis 1850 excède l'optimum climatique des années 1100-1200 ne lève pas les incertitudes qui existent sur l'ampleur de cet optimum. Puisqu'il est principalement évalué à l'aide de mesures dendroclimatologiques (métrologie de croissance annuelle des arbres) qui dépendent de variables qu'on ne connaît pas (L'arbre témoin était-il isolé ? Quelle était la pluviométrie lors des années considérées ? etc.).

D'autre part, d'autres éléments affectant le réchauffement dans un sens ou dans un autre ne sont pas quantifiés avec exactitude :

- l'effet thermique de l'urbanisation et des îlots urbains,
- la décroissance du magnétisme de la Terre qui est une cause du réchauffement,
- le rôle inhibiteur du réchauffement des aérosols d'origine humaine. On a constaté par exemple un réchauffement climatique dans la semaine qui a suivi le 11 septembre 2001, au cours de laquelle le trafic aérien s'est considérablement réduit,
- et les impacts réels des variations de l'activité solaire.

Mais quelle que soit l'importance de ces nuances, elles ne remettent pas en cause deux faits essentiels :

- la température terrestre augmente depuis 1850 et ce réchauffement s'accélère depuis 30 ans ;
- ce réchauffement est très largement causé par les activités humaines, elles-mêmes matérialisées par une émission croissante de gaz à effet de serre.

Que des causes naturelles de réchauffement pourraient s'ajouter aux conséquences de l'activité anthropique ne diminue en rien la portée du problème. Bien au contraire, cette hypothèse devrait contribuer à limiter encore plus nos émissions de gaz à effet de serre puisqu'une partie du réchauffement serait imputable à des phénomènes naturels de longue durée sur lesquels nous n'avons pas de prise.

B. LES INTERROGATIONS SUR L'ÉVOLUTION DU SYSTÈME CLIMATIQUE

Comment le système climatique de la planète peut-il évoluer au cours du siècle prochain ?

Les scénarios établis par le GIEC sont commandés par deux variables qui comportent des degrés d'incertitude :

- la « facture climatique » énergétique des économies mondiales,
- et la physique du climat.

1. La « facture climatique » de l'économie mondiale

Actuellement, 85 % des besoins en énergie de l'humanité sont assurés par la transformation de combustibles générateurs d'émissions de CO₂.

L'extrapolation des tendances actuelles aboutirait, d'après les évaluations moyennes, à augmenter massivement les émissions annuelles de gaz carbonique en 2050. Et si on se fie à la seule pente du développement des économies asiatiques et nord-américaines, les évaluations les plus pessimistes conduisent plutôt à une multiplication de ces émissions par un facteur supérieur à 5 à cet horizon.

Or, compte tenu de l'inertie du système, la **simple stabilisation** de la teneur en CO₂ de l'atmosphère autour de 550 ppm¹ – contre 380 ppm actuellement – **exigerait une diminution par 2 des émissions actuelles.**

¹ Parties par million.

Le facteur anthropique est donc une des variables de commande de l'évolution du climat de la planète. La forme de cette activité se traduira par une stabilisation, puis un ralentissement du réchauffement ou au contraire par son accélération avec des surprises climatiques dévastatrices dans bien des zones très peuplées.

2. La physique du climat

Par le nombre de paramètres dont elle dépend, la physique du climat est un phénomène d'une très grande complexité.

Mais les spéculations sur l'avenir du climat de la planète peuvent se résumer à deux questions principales :

- Quelle sera, au cours de ce siècle, le poids du changement climatique déjà acquis et programmé d'ici 2050 ?
- Quels sont les risques de dérapage du système climatique de la planète en cas d'accroissement des gaz à effet de serre ?

a) La vitesse acquise

Ni les modélisations effectuées sur le climat passé, ni l'exploitation des retours d'information sur les modélisations prédictives effectuées depuis 1990 ne génèrent un optimisme excessif quant aux effets futurs du réchauffement climatique déjà enregistré.

Un premier constat peu réjouissant, que l'on peut opérer grâce aux forages glaciaires (qui nous permettent de remonter jusqu'à 650.000 ans) est que, sur longue période, la force globale des puits de carbone (biomasse, océan) évolue en proportion inverse de la température.

Les modélisations prédictives indiquent parallèlement, sur courte période, que le réchauffement climatique va induire un affaiblissement progressif des puits :

- dans l'océan, en particulier parce que le réchauffement des couches superficielles y diminue les capacités de dissolution du gaz carbonique,
- dans la biomasse, en particulier parce que le réchauffement augmente la dégradation bactérienne des matières organiques du sol et donc accélère le volume des émissions.

Ces acquis théoriques sont confirmés par un retour d'expérience fort :

- au regard des modèles prédictifs antérieurs, ce sont, à chaque ajustement par les experts, les fourchettes hautes d'estimation qui se confirment,
- toute une série de faits particulièrement inquiétants matérialisent les effets du réchauffement :
 - huit des dix années qui viennent de s'écouler sont parmi les plus chaudes du siècle dernier, 2005 étant la plus chaude et la température dans l'hémisphère nord s'est accrue de $0,4^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$) en une dizaine d'années ;
 - la fonte des glaces s'accélère aux deux pôles, diminuant ainsi le pouvoir réfléchissant de la calotte glaciaire et donc les capacités d'atténuation du réchauffement,
 - le nombre des cyclones demeure à peu près constant, mais le nombre de cyclones graves (événements de catégories 4 à 5), s'est accru de 30 % entre 2000 et 2004.

L'ensemble de ces modélisations et de ces observations montre bien que même si l'on stabilisait immédiatement les émissions acquises de gaz à effet de serre à l'échelon mondial, **nous ne sommes probablement qu'au début des problèmes climatiques que va induire la seule vitesse acquise par le réchauffement climatique déjà enregistré.**

b) Les évolutions en cas de poursuite de la croissance des émissions de gaz à effet de serre

Que pourrait-il arriver si les émissions de gaz à effet de serre ne sont pas maîtrisées ?

Les réponses dans ce domaine ne sont pas uniques, compte tenu de la complexité des phénomènes. Elles ne relèvent pas non plus des mêmes horizons temporels. Mais elles peuvent être regroupées en **trois rubriques : les risques d'emballement du système, les interrogations sur la dissymétrie de la physique du climat et les risques de dérèglement global du système climatique.**

(1) Les risques d'emballlement du système

Il existe deux possibilités principales d'emballlement du système climatique, c'est-à-dire d'accélération des effets du réchauffement sur les puits à carbone, celles qui affectent le rôle de la végétation et celles qui concernent les sols.

- S'agissant de la végétation, deux points doivent être relevés.

D'une part, on a observé qu'en cas de très fortes chaleurs accompagnées de stress hydrique, les arbres ont tendance à restreindre leur activité de recyclage du gaz carbonique.

D'autre part, on a récemment mis en évidence le fait que les émissions de méthane que l'on croyait limitées aux zones humides proviennent aussi des forêts. D'où autant de questions sur le comportement de ces puits potentiels de carbone en situation de réchauffement.

- Concernant les sols, deux études récentes peuvent être mentionnées :

- D'une part, les zones arctiques et panarctiques dont le permafrost stocke du CO₂ et du méthane – qui pourraient être libérés en cas de réchauffement climatique – contiendraient beaucoup plus de CO₂ qu'estimé auparavant (de l'ordre de 11 milliards de tonnes, contre 2,7 milliards de tonnes dans les évaluations précédentes).
- D'autre part, des simulations faites en serre depuis 1978 montrent que le CO₂ dans les sols se libère plus rapidement qu'on ne le pensait en cas de réchauffement. Une modélisation effectuée en serre montre qu'un accroissement des émissions de gaz à effet de serre supérieur à 200 ppm (actuellement on atteint 380 ppm avec l'objectif de stabiliser cette teneur à 550 ppm en 2050) fait chuter le bilan de captation/émission du CO₂ par les sols.

(2) La dissymétrie des phénomènes climatiques

Les prévisions d'augmentation des températures sont des prévisions moyennes ; **elles n'excluent pas des phénomènes extrêmes autour de cette moyenne.**

Par exemple, aussi bien les observations que les modélisations donnent à penser que l'élévation des températures pourrait être plus forte dans le nord et l'extrême nord de l'Europe. C'est ainsi qu'en Sibérie l'augmentation des températures a été beaucoup plus accentuée depuis 150 ans (2,5° C contre ≈ 0,8° C en moyenne sur la planète). Ces données sont confirmées par les dernières modélisations prédictives du GIEC.

Par ailleurs, des études montrent, sans que l'on ait déterminé pourquoi, que la végétation de l'hémisphère Nord est un puits à carbone

beaucoup plus important par unité que celle de l'hémisphère Sud. De même, le CO₂ est-il quatre fois plus stocké dans l'Atlantique Nord que dans l'Atlantique Sud.

Les variations à la moyenne, la dissymétrie du système climatique planétaire sont autant de problèmes non résolus dont on mesure encore mal les conséquences sur les interrelations d'un système climatique en voie d'évolution.

(3) L'éventualité d'un dérèglement climatique profond

Deux éléments de la physique du climat pourraient y contribuer ou, en tout cas, amorcer ces dérèglements profonds avant la fin du siècle.

• **La fonte des glaces du Groenland** (dont on constate les prémices dans l'hémisphère Nord) représente un double danger :

- celui d'une élévation du niveau des eaux, non pas de l'ordre de 10 cm à 90 cm en 2100, comme dans la prévision du GIEC dont nous rappelons qu'elle ne tient pas compte d'événements tels que libération de gaz par le permafrost et augmentation de la libération du CO₂ par les sols, mais de l'ordre de 6 mètres pour le Groenland¹ auxquels s'ajoutent 6 mètres pour l'Antarctique – même si l'inertie thermique due à l'épaisseur de la couche antarctique donne à penser que ce dernier risque est plutôt d'ordre millénaire, sauf effondrements massifs,
- et celui d'un amoindrissement du pouvoir réfléchissant de ces deux zones.

• **Les premières perturbations dans la circulation de la dérive Nord-Atlantique du Gulf Stream ont été observées.** Le débit des eaux refroidies s'enfonçant dans les couches profondes de l'océan et alimentant les remontées du Gulf Stream a diminué de 50 % depuis 1957. Ce qui signifie, à rebours, que la force du courant remontant du Gulf Stream, qui garantit au nord-ouest de l'Europe un climat tempéré, est en passe de s'affaiblir.

¹ *D'après un rapport commandé par le Gouvernement britannique, la fonte du bouclier glaciaire du Groenland s'accélérera à compter d'une augmentation de la température de 1,5° C. Une étude très récente, mais dont les résultats sont controversés, établit qu'à la dernière interglaciation (- 130.000 ans) le niveau des mers était de 4 à 6 mètres plus élevé, à cause d'un réchauffement beaucoup plus fort de l'hémisphère Nord.*

Une modélisation, couplant les modèles de circulation de l'atmosphère et ceux de l'océan, a abouti aux résultats suivants :

- si l'on injecte 1 % de CO₂ par an dans le modèle jusqu'à 80 ans (doublement du CO₂ de l'océan), on fait diminuer la circulation océanique qui ne se rétablit qu'après 500 ans¹ ;
- mais si l'on poursuit cette injection de 1 % au-delà de 80 ans (on aboutit au quadruplement du CO₂ injecté dans l'océan en 160 ans), la circulation thermohaline ne se rétablit pas.

Dans le cas de commencement de réalisation, d'ici 2050, de chacun des risques de dérèglement décrits ci-dessus, les conséquences sur le climat de la planète pourraient être très sérieuses.

En définitive, que l'on s'attache à considérer les premiers effets du changement climatique, ses effets à venir sur la seule vitesse de réchauffement dès maintenant acquise, ou ses effets éventuels en cas d'absence de maîtrise des émissions de gaz à effet de serre, on se trouve confronté à des événements à conséquences lourdes et probablement plus proches que ne peut le suggérer l'inertie du système.

C. LES CONSÉQUENCES

1. Des effets physiques certains mais pas toujours perceptibles

Depuis une décennie, l'Europe est atteinte par les premiers effets physiques du réchauffement climatique : canicule de l'été 2003, tempête de 1999, inondations, fonte des glaciers, modification de la pluviométrie, etc.

Toutefois ces phénomènes climatiques, pour cruels et dévastateurs qu'ils soient quelquefois, ne sont pas encore systématiquement répétitifs. Et donc pas ancrés dans les mentalités collectives. Au demeurant, l'opinion est mithridatisée par les médias qui l'informent en flux continu des catastrophes climatiques qui affectent régulièrement le reste du monde : typhons, cyclones, sécheresses de grande ampleur, inondations diluviennes. D'où **une perception déformée de ce que pourraient être les conséquences physiques concrètes du changement climatique** et l'idée naïve qu'il existe des possibilités de réponses « à la hollandaise » du style : « *si la mer monte, on relèvera le niveau des digues* ».

Une telle vision traduit la méconnaissance de la nature des effets du changement climatique dont les incidences sont loin de se limiter à ces phénomènes extrêmes.

¹ De 1987 à 2000, on a mesuré une diminution de cette circulation en Islande.

Ces incidences varieront en fonction de l'ampleur de la hausse des températures et affecteront de façon très inégale l'ensemble de la planète.

Leurs conséquences ne sont donc pas immédiatement perceptibles, ni immédiatement descriptibles.

Mais il faut prendre conscience que déjà ont eu lieu des événements comme la poursuite du retrait des glaciers alpins et la translation d'une partie de la flore de quelques degrés latitude Nord. Ces phénomènes s'amplifieront, et s'y ajouteront le stress hydrique qui risque de frapper le sud de l'Europe, l'arrivée d'espèces invasives, la création de milieux plus favorables à la propagation virale ou la montée du niveau des océans auront des conséquences profondes sur nos modes de vie.

Si le danger n'est pas immédiatement perceptible, si son ampleur n'est pas encore quantifiable, il est certain.

On aurait tort d'oublier qu'à l'échelle des temps le climat tempéré qui a permis l'essor de l'Europe n'est qu'une rareté au milieu de périodes géologiques caractérisées par une très grande sécheresse. C'est tout le climat tempéré sur la planète qui est en cause.

2. Des effets financiers déjà quantifiables

a) Le coût actuel des changements climatiques

Avant d'évaluer les conséquences financières du changement climatique, il n'est pas inutile de garder à l'esprit un ordre de grandeur : le PIB mondial atteint environ 35.000 milliards de \$.

Dès maintenant, on est en mesure de chiffrer le coût des dérèglements climatiques enregistrés ces dernières années.

Aux Etats-Unis, le coût des événements climatiques toutes causes confondues a atteint 120 milliards de \$ en 2004, et 200 milliards de \$ en 2005, dont la majeure partie est représentée par la succession des grands événements cycloniques.

L'Europe n'est pas épargnée. **Depuis trente ans, le coût annuel a été multiplié par 15 en Europe.**

Les inondations de l'an 2000 en Allemagne ont causé des dommages évalués à 9,2 milliards d'€.

Le coût de la canicule de l'été 2003, qui s'est étendue à toute l'Europe, a été supérieur à 10 milliards d'€.

Sur les dix dernières années, la France a subi deux événements centenaires : la tempête de 1999 et les inondations de 2002-2003 (phénomène dont la période de retour est normalement de 500 ans).

En France, de 1989 à 2004, les dommages économiques causés par la sécheresse (et en particulier les dégâts cumulatifs sur les bâtiments construits sur des terrains argileux sans fondations adéquates) ont coûté 4 milliards d'€, dont 1,5 milliard pour la seule canicule de 2003.

Au-delà de la montée certaine des coûts du changement climatique, ces données mettent en évidence que **nos sociétés, plus complexes mais aussi plus fragiles, sont beaucoup plus vulnérables à ces assauts du climat** qu'elles ne pouvaient l'être il y a quelques centaines d'années. L'état actuel de la ville de La Nouvelle-Orléans, près d'un an après le cyclone qui l'a détruite, en témoigne.

b) Les prévisions

Le simple constat de l'importance relative de ces dommages économiques (0,6 % du PIB mondial pour les seuls Etats-Unis en 2005 – ce qui est un pourcentage très important), alors même que le changement climatique n'en est qu'à ses prémices, **conduit à s'interroger sur l'évolution de la charge financière des événements climatiques futurs.**

L'Institut allemand pour la recherche économique (DIW) a essayé de modéliser ces coûts :

- sur la base d'un accroissement de la température au sol de 1°C en 2050 (soit l'hypothèse basse du rapport du GIEC de 2001),
- et en agrégeant, assez largement, les dommages directs et indirects (santé, transformation des écosystèmes, dommages aux biens) de ce niveau au réchauffement climatique.

Les résultats de cette modélisation, qu'il faut naturellement considérer comme des ordres de grandeur assez grossiers¹ compte tenu de la nature de l'exercice, sont assez impressionnants :

- sur la période 2004-2050, la hausse de 1° C de la température causerait un coût global de 214 000 milliards de \$;
- **en 2050, pour les seuls Etats-Unis, ces coûts représenteraient 2.000 milliards de \$ (soit 10 fois plus qu'en 2005) et 6 % du PIB mondial actuel.**
- pour la seule Allemagne, ce coût atteindrait 137 milliards d'€ en 2050.

¹ Mais probablement sous-estimés car l'hypothèse basse du GIEC, sur laquelle ces travaux sont assis, est déjà obsolète en 2006.

Il est indispensable que d'autres études soient entreprises sur les coûts futurs du changement climatique, en particulier à l'horizon d'une génération. En effet, les dépenses à régler pour les catastrophes rendront bientôt plus difficiles encore les investissements nécessaires pour changer de mix énergétique mondial.

*

* *

En conclusion de cette analyse succincte de l'état de nos connaissances et de nos interrogations sur le changement climatique, on peut avancer, avec de quasi-certitudes, que :

1. **le changement climatique est principalement d'origine anthropique,**
2. **sa vitesse dès maintenant acquise aura des conséquences pendant plusieurs générations même si nous arrivons à stabiliser les émissions de gaz à effet de serre,**
3. ses **conséquences** seront beaucoup plus profondes humainement et **beaucoup plus coûteuses économiquement** que la population ne l'imagine au seul vu des accidents climatiques actuels,
4. si les émissions de gaz à effet de serre ne sont non seulement pas stabilisées mais s'accroissent durablement, il existe des risques **d'emballement et de début de dérèglement climatiques graves contre les effets desquels nos sociétés ne sont pas armées.**

II. LA NÉCESSITÉ DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le danger potentiel que représente la croissance des émissions de gaz à effet de serre, la probabilité d'un changement climatique dont les conséquences seront sérieuses inciteraient à eux seuls à réviser rapidement notre modèle de production et d'utilisation de l'énergie.

La nécessité d'impulser des changements rapides est d'autant plus flagrante que l'on subit une raréfaction de l'offre des matières premières énergétiques et que l'on doit anticiper la croissance continue de la demande de ces produits.

A. LA CERTITUDE D'UNE RARÉFACTION DE L'OFFRE DE MATIÈRES PREMIÈRES ÉNERGÉTIQUES

Parmi les énergies primaires que nous utilisons, 90 % d'entre elles sont des sources d'énergie fossile :

- 41 % pour le pétrole,
- 21 % pour le gaz,
- 21 % pour le charbon,
- et 7 % pour le nucléaire.

Ce simple rappel permet de hiérarchiser l'analyse de l'offre de matières premières énergétiques.

Le pétrole¹ est le point central du débat en raison des difficultés de substitution d'une source d'énergie qui a façonné notre organisation économique et sociale.

En témoigne assez bien une courbe d'évolution fournie par l'Agence internationale pour l'énergie (AIE), qui montre qu'il existe une parfaite identité d'évolution entre la croissance du PIB mondial de 1971 à 2004 et la croissance de la consommation de pétrole dans le secteur des transports.

Mais ceci ne signifie pas que les autres sources d'énergie primaire, comme le charbon, le nucléaire ou l'éolien, ne permettront pas à l'avenir des possibilités de substitution.

¹ ... et à un moindre degré le gaz naturel, dont l'état des ressources disponibles est proche et les courbes de prix analogues. Ces deux sources d'énergie primaire couvrent les deux tiers des besoins de la planète.

1. Le pétrole¹

L'accélération récente de la croissance de la Chine et de l'Inde qui représentent plus du tiers de la population mondiale et la poursuite de la croissance américaine **ont créé les données d'un choc pétrolier qui a remis au premier plan le débat sur la durée de disponibilité des réserves mondiales du pétrole.**

Au-delà de cette tension qui affecte les ressources pétrolières mais également les produits pétroliers – du fait des insuffisances actuelles de l'appareil de raffinage, il s'agit de **mesurer l'horizon de temps pendant lequel nous disposerons d'une ressource** qui présente le double intérêt de pouvoir être convertie en électricité et d'être un vecteur de locomotion jusqu'ici irremplaçable.

La réponse à cette question ne peut être qu'approximative puisqu'elle dépend d'équations de prix qui régulent le système de deux façons :

- à la hausse, elles repoussent l'horizon d'épuisement des ressources en pesant sur leur consommation et en valorisant les conditions d'exploitation ou d'exploration de ces ressources,
- à la baisse, elles ont l'effet inverse.

Par ailleurs, la quantification prudente de ces réserves doit être tempérée par les éléments qui pèsent sur la réalité de leur disponibilité.

a) L'évaluation des réserves de pétrole : des données évolutives en fonction des technologies et de l'économie

(1) Les réserves prouvées

Evaluer les réserves prouvées, c'est-à-dire celles qui ont 90 % de chances d'être récupérées grâce aux techniques actuelles et dans des conditions économiques courantes, est un exercice difficile.

Selon les termes d'un géologue de l'Institut français du pétrole (IFP) spécialisé dans l'exploration, cela revient à « *mesurer l'état des stocks d'un entrepôt en regardant par le trou de la serrure après avoir fait le tour du bâtiment* ».

¹ Pour plus de détails sur cette question, on renverra au rapport publié par la délégation à la Planification du Sénat « Rapport d'information n° 105 (2005-2006) du 24 novembre 2005 - par MM. Joseph Kergueris et Claude Saunier : La hausse des prix du pétrole : une fatalité ou le retour du politique ».

En l'état des estimations convergentes des trois principaux évaluateurs mondiaux (la « BP Statistical Review », l'United States Geological Survey (USGS) et l'« Oil and Gas Journal »), ces réserves sont estimées à 143 milliards de tonnes à la fin de 2003, chiffre à référer aux 130 milliards de tonnes de pétrole déjà extraites de la croûte terrestre.

Ce volume représente également **une quarantaine d'années de consommation mais... au rythme actuel**¹.

Or, il devient plus que probable qu'avant trente ans la consommation par habitant en Chine sera celle de l'Europe et donc le double de celle des Etats-Unis.

(2) Les réserves de gisements encore à découvrir

En l'état des estimations de l'USGS, seul organisme dans le monde qui réalise des études exhaustives sur le sujet, elles s'élèveraient à 140 milliards de tonnes.

Mais beaucoup de ces ressources dites « d'avant-arc » (c'est-à-dire celui qui réside sous les couches tectoniques à 6 km de profondeur) mobilisent des moyens technologiques beaucoup plus importants.

En effet, les outils actuels ne permettent pas « d'imager » ces réservoirs sous ces plaques.

Et comme il n'y a pas, dans ce cas, de réfraction verticale, on doit poser des sondeurs sur 20 km et non plus sur 2 km comme dans le cadre d'une détection normale, ce qui exige plus de 100 000 capteurs.

Même avec ces déploiements massifs, les sondages aboutissent souvent à des retours non conformes aux prévisions de modélisation.

Ce volume représente également **une quarantaine d'années de consommation, toujours au rythme actuel**.

(3) Les réserves en pétrole non conventionnel

Le pétrole non conventionnel est formé d'hydrocarbures denses et fortement visqueux qui doivent être fluidifiés ou allégés pour être produits en quantités suffisantes et économiquement rentables.

Sont principalement concernés les bruts extra lourds du Venezuela et les sables asphaltiques du Canada. Les réserves récupérables, en l'état de la technologie qui progresse rapidement, sont évaluées à 80 milliards de barils – de l'ordre de 15 % de la ressource en place. Notons que cela correspond aux réserves prouvées de pétrole conventionnel du Moyen-Orient.

¹ Si 4 milliards d'hommes consommaient autant de pétrole que la population des USA et de l'Europe occidentale en 2005, cela limiterait les réserves à 6 ans...

Ces ressources pétrolières sont assez coûteuses à mobiliser car leur extraction exige énormément d'énergie et d'eau. En outre, certaines de ces exploitations sont assez destructrices de l'environnement.

On estime par ailleurs qu'en l'état de nos technologies, seul un gros cinquième de la ressource est exploitable.

Ces réserves représenteraient au moins une **vingtaine d'années de consommation au rythme actuel.**

(4) Les ressources offertes par l'amélioration de la récupération

Les progrès des technologies (cf. deuxième partie) permettent d'accroître les résultats de l'exploration et de l'exploitation des puits existants.

Le taux moyen de récupération actuel du pétrole est de l'ordre de 35 %. Un point de progression de ce taux représente deux ans de consommation mondiale.

De fait, des récupérations à 70 % sont déjà réalisées dans de vieilles régions pétrolières comme le Texas.

On estime, en fonction des échelles de prix, qu'il serait possible de porter ce taux moyen à 50 % (accroissement qui représenterait une activation des réserves de l'ordre de 117 milliards de tonnes), **soit environ 30 années de consommation.**

b) Quelle est la disponibilité effective de ces réserves ?

L'évaluation qui précède quantifie à **130 ans les réserves ultimes** de pétrole – ceci, naturellement, au rythme de consommation actuel – ce qui restreint fortement cet horizon.

Mais, telle quelle, **cette mesure des disponibilités mondiales en produits pétroliers doit être tempérée.**

D'une part, des doutes croissants se font jour sur la réalité de certaines de ces réserves. Dans le passé, aussi bien les compagnies pétrolières pour des raisons de présentation de bilan, que les pays détenteurs des principales réserves pour des raisons stratégiques, ont surdéclaré leurs réserves disponibles.

D'autre part, on doit rappeler qu'à l'exception des pétroles non conventionnels dont les réserves connues se situent sur le continent américain, plus des deux tiers des réserves de pétrole se situent au Moyen-Orient, dans une zone qui présente des risques politiques de nature à relativiser la permanence de leur disponibilité. **La sécurité des approvisionnements pétroliers est loin d'être assurée sur ce point.**

2. Le gaz naturel

Les estimations sur les réserves mondiales de gaz naturel sont moins convergentes que celles portant sur les réserves pétrolières.

Ses explorations sont, en effet, plus récentes, souvent dérivées des recherches de bassins pétroliers, et encore trop centrées sur la recherche terrestre (en 2002, seulement 29 % de la production résulteraient d'une exploitation en mer).

a) Les réserves prouvées (90 % de probabilités d'extraction), probables (50 % de probabilités d'extraction) et possibles (10 % de probabilités d'extraction)

En 2004, les réserves étaient évaluées par Codigaz (Centre mondial d'information sur le gaz) à 180 milliards de m³, **soit 66 ans de réserves de production, ou quarante ans si la croissance annuelle de l'extraction se poursuit au taux actuel de 2,3 %.**

b) Les réserves estimées

En 2000, l'USGS estimait à 147 milliards de m³ les réserves excédentaires, soit **53 années de production** au rythme actuel d'extraction.

c) Les améliorations d'exploration et d'exploitation

L'effet de celles-ci est évalué à un ressaut de 104 milliards de m³, soit **38 années de réserves supplémentaires**, toujours au rythme actuel d'extraction.

3. L'uranium

Les réserves d'uranium prouvées sont actuellement évaluées à 70 ans de consommation, et les réserves probables à un siècle.

Mais leur potentiel est très lié à l'amélioration de leur exploitation.

On estime que les réacteurs de la génération IV augmenteraient ce potentiel d'un facteur 50 à 80.

4. Le charbon

Selon trois sources convergentes, les estimations des réserves mondiales prouvées et probables de charbon (anthracite, charbon bitumineux et sous-bitumineux et lignite) sont évaluées à environ 1.200 milliards de tonnes (80 % de réserves prouvées et 20 % de réserves probables), **ce qui représente plus de deux siècles de consommation au rythme actuel.**

*

* *

Au total, et sous réserve des doutes que l'on peut entretenir sur la disponibilité certaine des réserves pétrolières annoncées, le bilan des sources fossiles d'énergie primaire disponibles pourrait être assez rassurant, puisque ces réserves atteindraient plus d'un siècle pour le pétrole et le gaz naturel et plus de deux siècles pour le charbon – le cas de l'uranium étant particulier.

Dès lors, pourquoi évoquer le spectre d'une raréfaction de ces ressources alors même que les horizons ultimes de leur consommation dépassent plusieurs générations ?

Parce que la disponibilité à terme de ces ressources dépend de leur rythme de consommation et donc des facteurs anthropiques de longue durée d'évolution de leur demande.

B. LES FACTEURS ANTHROPIQUES D'ÉVOLUTION DE LA DEMANDE

Il y a deux lectures du choc pétrolier que l'économie mondiale a enregistré en 2004 et 2005.

L'une, classique, consiste à estimer que ce phénomène est lié aux cycles de production du secteur.

La mécanique en est connue : après un choc pétrolier, la demande baisse et les prix diminuent, c'est ce que les spécialistes appellent un contre-choc pétrolier.

Ce contre-choc et les bas niveaux relatifs de prix conduisent les entreprises à diminuer leurs investissements en reconstitution de gisement, en matériel d'exploration et de transformation, et en formation des hommes¹.

En sens inverse, après quelques années la croissance de la demande, confrontée à une offre transitoirement insuffisante, aboutit à une tension sur les prix et donc à un choc pétrolier qui rend rentables de nouveaux investissements d'exploration et de transformation.

Cette lecture, vérifiée expérimentalement, est pertinente ponctuellement. Mais probablement pas pertinente à long terme.

Car la ressource se raréfie. Actuellement, chaque année on découvre deux fois moins de pétrole que l'on n'en consomme. Et même si les réserves ultimes se situent à un horizon de plusieurs générations, leur mobilisation deviendra de plus en plus difficile et répondra de moins en moins au schéma classique « choc/contre-choc pétrolier ».

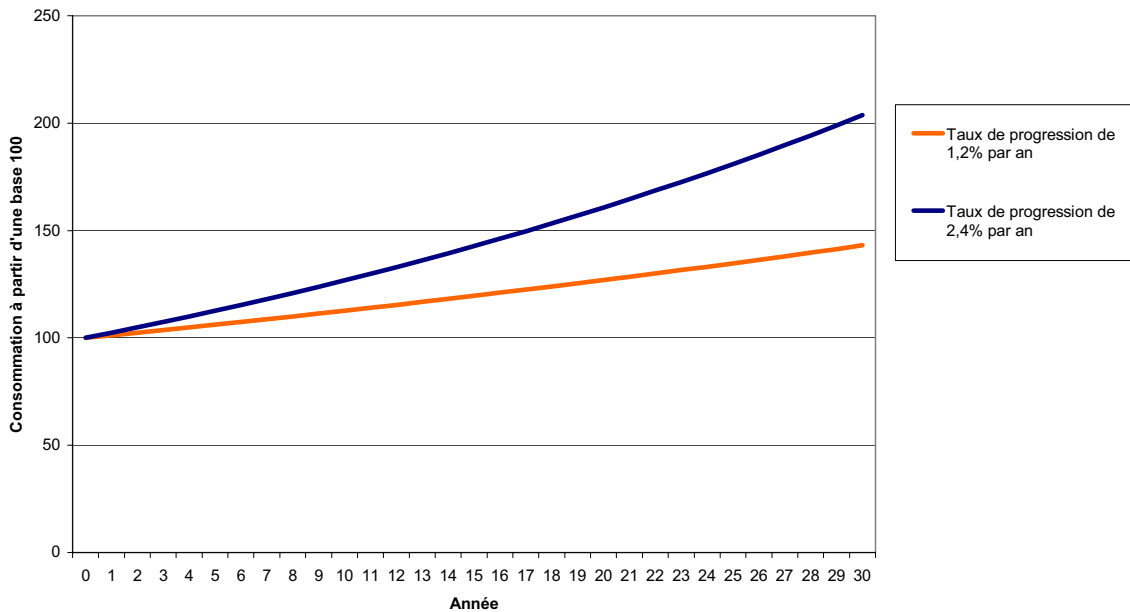
De plus, les problèmes liés à la durabilité du développement sont à envisager sur plusieurs décennies et non sur l'horizon limité que représente une dizaine d'années. Car la prospective change les perspectives de l'actuelle crise pétrolière. On n'en donnera qu'un exemple : de 1990 à 2001, la croissance de la demande mondiale de brut a atteint 1,2 %, mais 2,4 % sur les trois dernières années.

Si on extrapole ces deux tendances :

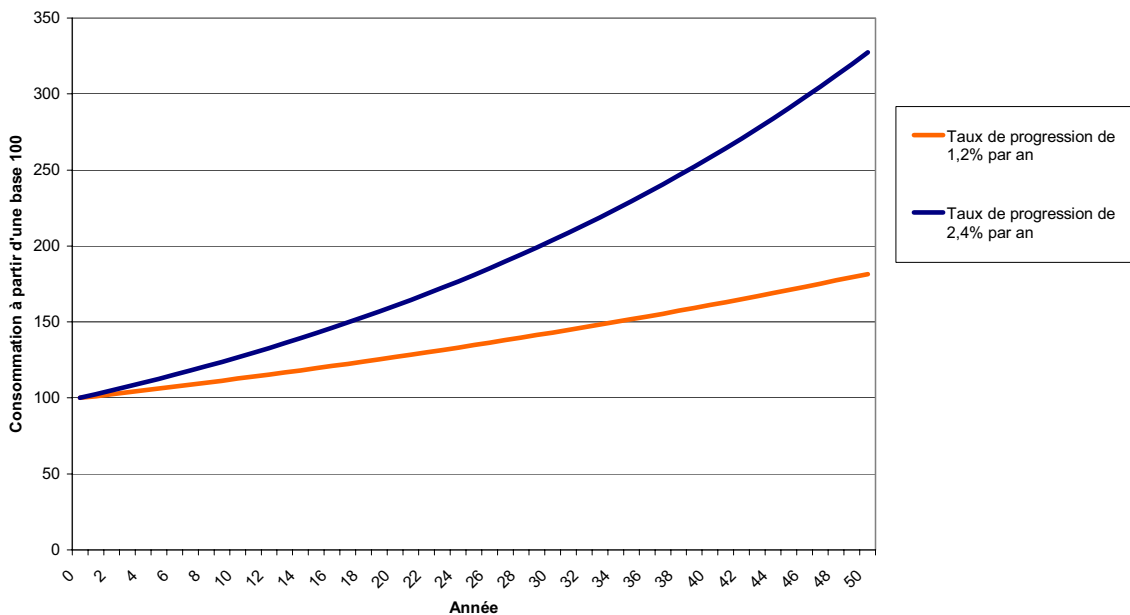
- **à 1,2 % de croissance, la demande est multipliée par 1,4 en 20 ans et 1,8 en 50 ans,**
- **mais à 2,4 % de croissance, la demande double en trente ans et triple en 50 ans.**

¹ Par exemple, à la suite du contre-choc intervenu de 1985 à 2000, les sociétés spécialisées en exploration pétrolière en mer manquent à la fois de plates-formes et d'ingénieurs formés à ces techniques et ne peuvent répondre à toutes les demandes actuelles d'exploration.

Progression de la consommation sur 30 ans



Progression de la consommation sur 50 ans



Or, lorsque l'on examine les principaux déterminants qui commandent la demande mondiale de sources d'énergie primaire, à savoir la démographie et l'essor de l'économie mondialisée de marché, on ne peut que constater que ces éléments poussent à une hausse de la demande d'énergie plus forte que celles enregistrées jusqu'ici.

1. La démographie brute

a) Une inflexion démographique

L'explosion démographique n'aura pas lieu. Les projections de l'ONU du début des années 90 tablaient sur une population mondiale de 11 à 15 milliards d'habitants en 2050.

Les dernières révisions effectuées par les Nations Unies tablent, en hypothèse moyenne, sur une population de 8,9 milliards d'hommes en 2050 (soit un milliard d'hommes de moins qu'envisagé en 1994) contre 6,3 milliards aujourd'hui.

Plusieurs raisons concourent à cette rectification démographique :

- la baisse, plus rapide que prévue, des taux de fécondité. Cet indice, qui était de 6 dans les pays en voie de développement en 1950, n'est plus que de 2,92 ;
- l'effet de la pandémie du SIDA qui se traduit, notamment en Afrique, par une perte de population potentielle de 500 millions d'habitants.
- le fait que toute une série de pays – y compris la Chine – entrent peu à peu dans une **seconde transition démographique caractérisée par une évolution où l'on passe durablement sous le seuil de renouvellement de la population.**

b) Une population mondiale en accroissement

Si les hypothèses évoquées ci-dessus se réalisent, la population mondiale va croître de 2,6 milliards d'ici 2050.

Ces 2,6 milliards d'habitants supplémentaires seront un premier facteur d'accroissement de la demande dans le demi-siècle à venir.

Si l'on analyse de façon plus détaillée certaines des composantes de cette croissance prévisionnelle, on constate :

- que la population des pays forts consommateurs de ressources naturelles ne baisse que très légèrement (l'Europe des 25 ne passerait que de 454 millions d'habitants en 2004 à 431 millions d'habitants) ou augmente assez fortement (la population américaine croîtrait dans la même période de 294 millions à 404 millions d'habitants, soit 37 % d'accroissement),
- que le quart de l'accroissement de population à venir (d'ici 2050) concerne deux pays dont l'accélération de croissance commence à peser sur les réserves planétaires. La population de la République

indienne atteindrait 1,5 milliard d'habitants, et celle de la Chine populaire 1,4 milliard d'habitants.

Indépendamment des efforts qu'il reste à faire pour combler le fossé Nord-Sud, **la croissance de la population mondiale s'effectuera donc dans des secteurs géographiques en forte progression économique.**

c) Des interrogations

Deux autres facteurs méritent d'être soulignés, dont l'impact sur le développement durable est difficile à évaluer.

(1) L'urbanisation

La plus forte partie de la croissance mondiale à venir amplifiera les transferts d'une société rurale vers les villes. **On estime que deux milliards d'habitants supplémentaires vont accroître la population urbaine.**

Ce qui signifie, par exemple, que les pays en voie de développement devront construire **l'équivalent d'une ville d'un million d'habitants par semaine d'ici 2050.**

Cette croissance urbaine aura en outre deux traits dominants : la poursuite de la constitution de mégalopoles et la croissance des implantations urbaines au bord de la mer. D'où autant de problèmes d'équilibre des territoires.

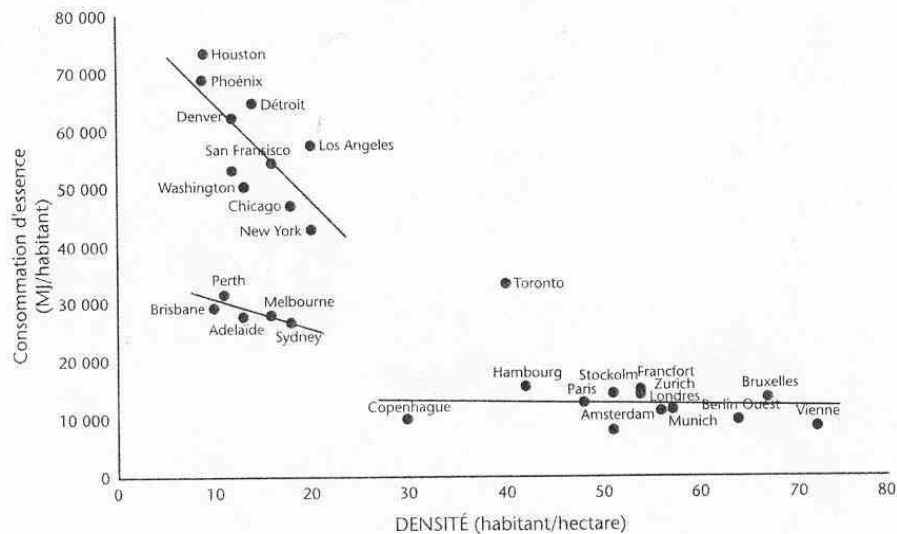
En toute première analyse, ce phénomène pourrait avoir plusieurs conséquences :

- **la raréfaction des terres disponibles pour l'agriculture ou pour l'exploitation de la biomasse.** L'homme urbain occupant actuellement 2 % des terres émergées, dont 10 à 15 % seulement sont cultivables, la croissance urbaine prévue d'ici 2050 porterait ce pourcentage à 4 % **et réduirait donc les terres cultivables de 13 % à 20 % par rapport à leur surface actuelle ;**
- la montée forte d'une demande de production d'électricité de masse plutôt qu'individuelle et décentralisée (par exemple, plutôt la centrale thermique ou nucléaire que le photovoltaïque ou l'éolienne) ;
- en fonction des schémas d'urbanisation qui seront choisis des modèles d'utilisation des transports favorisant (automobile) ou

diminuant (transports en commun) les émissions de gaz à effet de serre ;

- en fonction du type d'urbanisation (mégalo-poles concentrées sur de grands immeubles ou urbanisation pavillonnaire), le bilan énergétique global de cette urbanisation peut varier :

Les villes denses énergétiquement plus efficaces



(Source : Newman et Kenworthy, 1989).

- pour la part de ce développement des villes s'effectuant dans des pays à croissance rapide, une interrogation sur la consommation d'énergie des immeubles résidentiels et de service qui y sont et y seront bâtis.

(2) Le vieillissement de la population

Le vieillissement de la population mondiale se poursuivra, et pas uniquement dans les pays développés. **En 2050, les plus de soixante ans représenteront plus du tiers de la population du monde.** On n'entrevoit pas clairement les conséquences de ce phénomène sur la demande d'énergie mondiale.

Ce vieillissement des populations affectera fortement l'Asie (Chine, Japon, Corée, sud-est asiatique). Comme beaucoup des pays concernés n'ont pas ou peu de systèmes de retraite, il pourrait avoir pour conséquence d'y accroître les populations actives et donc la demande d'énergie.

2. L'essor de l'économie de marché mondialisée

Très souvent l'emploi du terme mondialisation est ambigu ou controversé.

De quoi s'agit-il ?

En raison de l'abaissement des coûts de transport et de libéralisation du commerce international, rythmée dès les années soixante par les fameux « Rounds » de l'ex-Gatt, **la logique de l'économie de marché s'est étendue à la planète**, aussi bien à la faveur des inflexions déjà anciennes de la direction politique chinoise que des suites de la chute du mur de Berlin.

Cette confrontation mondiale de l'offre et de la demande s'est d'abord manifestée dans le domaine de la circulation des capitaux, facilitée par les nouvelles technologies de l'information.

Quels effets de cette transformation sans précédent de l'économie de la planète peuvent peser sur la demande d'énergie primaire et la mise en œuvre d'une politique mondiale de développement durable ?

En première analyse, **on peut en discerner cinq** : le poids relatif des hommes, l'étendue des espaces, les mécanismes de régulation du système, les ruptures technologiques et le jeu des constantes de temps.

a) Le poids relatif des hommes

Mesurée par son évolution à l'horizon 2050, la démographie mondiale est déjà suffisamment inquiétante et structurante pour l'avenir. Il ne s'agit pas ici d'évaluer les effets de l'augmentation brute de 2,6 milliards d'habitants qui nous est promise, mais d'en discerner les conséquences en fonction de la poursuite de la mondialisation.

Face à un phénomène aussi complexe que la mondialisation, il est préférable de **s'en tenir à plusieurs certitudes qui génèrent autant d'interrogations sur la faisabilité et les moyens de parvenir à un développement durable : le comblement progressif du fossé Est-Ouest, la croissance des besoins énergétiques de l'Amérique du Nord et le creusement du fossé Nord-Sud¹.**

¹ En éludant le cas de l'Europe, où la croissance est faible, la démographie en voie de stabilisation et même une prise de conscience forte de la nécessité d'une croissance économe en énergie émerge.

(1) Le comblement progressif du fossé Est-Ouest

Amorcé au début des années soixante-dix par l'expansion économique du Japon et élargi peu après avec l'apparition des « dragons » du sud-est asiatique (Corée, Taïwan, Singapour, Hongkong), le nivellement économique entre l'Est et l'Ouest s'est accéléré et désormais il dépend surtout de deux puissances : la Chine et l'Inde, soit au total un peu plus du tiers de la population mondiale, et le même pourcentage prévu en 2050 (2,9 milliards par rapport à une population mondiale de 8,9 milliards).

(a) La Chine

Le produit intérieur brut de la Chine a été multiplié par 6,4 de 1982 à 2002, et par 4 sur la seule décennie 1992-2002. Son accroissement se poursuit à un rythme de 9-10 % l'an, soutenu par un taux d'épargne des ménages de l'ordre de 40 % et par un afflux régulier d'investissements étrangers.

Entre 1991 et 2003, la Chine a ainsi contribué à 30 % de la croissance mondiale.

En 1987, le produit intérieur brut de la Chine se situait au 12^e rang mondial (au niveau des Pays-Bas), en 2002 ce produit égalait celui de la France. Il la dépasse aujourd'hui.

A ce rythme, le produit intérieur par habitant de la Chine rejoindrait celui de la France vers 2030, et celui des Etats-Unis vers 2040.

En tablant sur la théorie des rendements décroissants du capital, les économistes estiment pourtant que la croissance chinoise ne pourra pas se poursuivre à ce rythme. On s'acheminera d'ici dix ans vers des rythmes de croissance plus proches de 5-6 % que de 10 %.

Cette façon de considérer l'évolution de la Chine – qui est également assise sur des observations antérieures – concernant notamment la Corée – appelle deux observations.

En premier lieu, le **cas chinois présente une particularité qui pèse en faveur du maintien d'un taux de croissance élevé ou très élevé**. L'ascension progressive d'une classe moyenne de l'ordre de 200 millions d'hommes à des standards de vie proches de ceux de l'Occident, la sortie d'un état de survie ou de précarité du reste de la population, le rôle déjà direct des exportations chinoises dans la division internationale du travail, la poussée forte de l'urbanisation vont concourir au maintien d'une forte demande interne.

Par ailleurs, si on extrapole en 2030 et en 2050, soit la poursuite d'un taux de croissance fort (8,5 %) ou d'un taux moins élevé (5,5 %)¹, **on aboutit à des grandeurs qui donnent la mesure de la nouvelle donne économique mondiale :**

- à 8,5 % de croissance annuelle, **le PIB de la Chine serait multiplié par 11,5 en 30 ans et par 60 en 50 ans ;**
- à 5,5 % de croissance annuelle, **ce PIB serait multiplié par 5 en 30 ans et par 14,5 en 50 ans.**

Or, actuellement, compte tenu de l'inefficacité relative du système chinois de transformation d'énergie, la consommation d'énergie y croît annuellement de deux points de plus que le PIB.

On mesure à ces données le problème que pose la Chine en matière de développement durable, car aussi bien dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans un pays qui dispose d'immenses ressources de charbon que sous l'angle de la raréfaction des ressources en hydrocarbures dans un pays où les besoins en pétrole s'accroissent, **l'expansion de la Chine introduit une variable d'écart inquiétante dans le modèle énergétique mondial.**

Au demeurant les Chinois se plaisent à rappeler qu'en 1830 leur pays produisait 30 % du PIB mondial et qu'il n'est pas anormal qu'il retrouve ce pourcentage.

(b) L'Union indienne

La croissance de l'Union indienne est passée d'un taux de 4 % dans les quarante années qui ont suivi l'indépendance à 6 % jusqu'en 2000 ; sur les trois derniers exercices elle s'est accélérée avec un taux de 8 %.

Des études convergentes auraient tendance à montrer que l'Inde a un potentiel de croissance supérieur à celui de la Chine et que cette croissance se maintiendra à un taux au moins proche de 6 % jusqu'en 2040.

Or, la croissance indienne repose, en matière d'énergie, sur un schéma assez proche de celui de la Chine. Elle produit à 57 % son électricité à l'aide de charbon, ses besoins en pétrole croissent très fortement.

On assiste donc – avec un décalage d'une dizaine d'années – à une autre très forte montée en puissance de la demande d'énergie d'un pays dont la croissance permet d'être soutenue et repose sur une équation

¹ *Même si le résultat de ces extrapolations brutes trace la limite de l'exercice car les ressources de la planète ne suffiraient probablement pas – en l'état des technologies qui seront alors disponibles – à assurer une multiplication par 60 du PIB de la Chine en 2050, à moins d'un changement radical de modèle économique, et notamment de mix énergétique.*

énergétique à forte émission de gaz à effet de serre et à forte demande pétrolière potentielle.

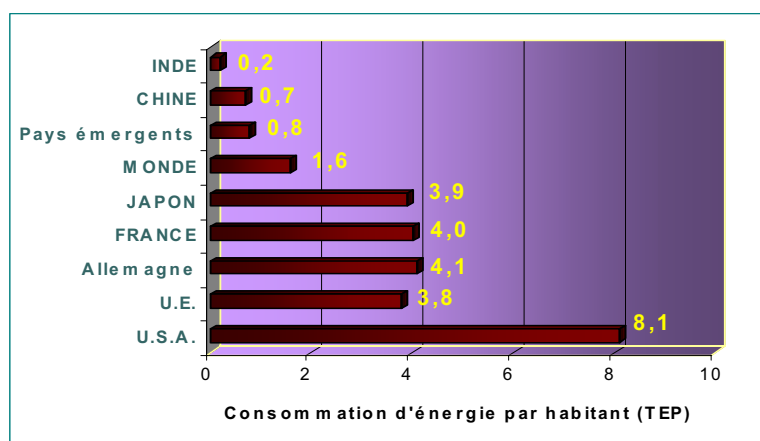
(2) Le maintien d'une forte demande énergétique en Amérique du Nord

Du fait d'un taux de progression démographique interne élevé et de flux d'immigration permanents, la population de l'Amérique du Nord (Etats-Unis, Canada) passerait de 330 millions en 2000 à 430-440 millions d'habitants en 2050.

Contrairement à l'Europe, les taux de croissance y sont relativement élevés pour une économie très développée (de l'ordre de 3,5 %-4 %). Des taux de croissance de cet ordre aboutissent à des progressions du PIB non négligeables :

- **une multiplication par 2,8 en trente ans,**
- **et une multiplication par 5,8 en 50 ans.**

Même si de telles progressions seront limitées par suite du déficit croissant de la balance commerciale des Etats-Unis, on rappellera que cette croissance est particulièrement dispendieuse en énergie, ce qui renforce la nécessité d'un changement de politique énergétique aux Etats-Unis :



Source : AIEA

Ainsi :

- en 2001, **290 millions** d'Américains consommaient **8 tonnes** d'énergie en équivalent pétrole par tête d'habitant,

- en 2001, les **400 millions d'Européens** de l'Europe des Quinze consommaient de l'ordre de **quatre tonnes et demie** d'énergie sur la même base¹,
- à la même date et sur les mêmes bases, les Chinois ne consommaient que **0,9 tonne** et les Indiens **0,5 tonne** (soit respectivement 8 et 16 fois moins qu'un Américain).

Cela signifie, en comparant les données relatives par habitant pour la population brute, **que 330 millions d'Américains consomment au total 2,5 fois plus de tep que 1 300 millions de Chinois.**

A un rythme de progression qui aboutirait à multiplier par presque trois en 30 ans le PIB de l'Amérique du Nord, alors que celui de la Chine serait au minimum multiplié par cinq et sans doute par plus de dix, on imagine les tensions sur la demande d'hydrocarbures qui se manifesteront et les conséquences de l'accroissement de cette demande sur le changement climatique.

(3) L'aggravation de la fracture Nord-Sud

Ces dernières années, la pauvreté a diminué dans le monde.

Mais cette donnée incontestable ne repose que sur la réduction de l'écart Est-Ouest et, dans une moindre mesure, sur le développement de certains pays d'Amérique latine, notamment le Brésil et le Mexique. En revanche, sur d'autres zones, l'écart s'accroît.

La mise en œuvre mondiale de l'économie de marché aboutit à une valorisation inégale et une sélection des territoires de la planète.

En quelques mots² :

- en 1971, les pays les moins avancés (PMA) – ceux où le revenu par tête était inférieur à 900 \$ – étaient au nombre de 25 ; en 2001, ce nombre a été porté à 49 ;
- en 1965, les écarts de revenus étaient de 1 à 30 entre pays développés et pays en voie de développement ; en 2000, cet écart a été porté de 1 à 78 ;
- en 2000, 20 % des habitants les plus pauvres de la planète ne produisaient plus que 1,1 % du produit intérieur brut mondial, contre 2,3 % en 1960 ;

¹ *Moyenne en partie due au climat (2,5 tonnes et demie pour les Portugais, 6,5 tonnes pour les Finlandais).*

² *Les données qui suivent sont extraites de l'ouvrage de Laurent Carroué « Géographie de la mondialisation ».*

- en 2001, un quart de la population mondiale n'avait pas accès à l'électricité, et la moitié pas accès au téléphone.

Quelles peuvent être les conséquences pour le développement durable de l'aggravation des différences de développement qui affectent entre le tiers et la moitié de l'humanité ?

En première analyse, et en fonction de ce qui vient d'être exposé sur les conséquences des croissances chinoise et indienne et de la poursuite de la croissance américaine, on pourrait cyniquement se réjouir de ce qu'une partie des habitants de la planète demeurent à l'écart d'un mouvement qui aboutit à surexploiter ses ressources et à mettre en danger les équilibres de la biosphère.

Mais, indépendamment du caractère moralement peu défendable de cette position, l'aggravation de l'écart Nord-Sud peut avoir deux types de conséquences directement néfastes pour le développement durable :

- elle peut, tous facteurs égaux par ailleurs, contribuer à retarder et à minorer l'inflexion démographique que l'on observe depuis peu,
- elle est également susceptible de pousser à une surexploitation des espaces naturels et donc de porter atteinte à la préservation de la biodiversité.

b) L'étendue des espaces

Comme le passage de navires marchands génois en mer du Nord vers 1270 a marqué une première unification de certains marchés européens, la généralisation des échanges internationaux a accru fortement le volume et l'étendue quotidienne des espaces de la mondialisation.

Si, depuis 1950, le PIB mondial a été multiplié par 6, les exportations mondiales ont été multipliées par 80.

Les données de l'échange ont été renouvelées. Car commercer de Londres à Paris ou faire du tourisme d'Hambourg en Avignon n'a pas les mêmes répercussions sur la consommation d'énergie que commercer de Los Angeles à Shanghai ou visiter l'Indonésie au départ de Rome.

Le volume des transports maritimes a enregistré une augmentation de 70 % de 1970 à 2003 et l'on conçoit mal que la transformation progressive de la Chine en usine du monde infléchisse négativement cette progression.

Mais ce sont surtout les transports aériens, de personnes et de fret, qui explosent, avec une progression constante de 5 % par an.

Il y a en permanence, 24 heures sur 24, 150 000 personnes dans les airs. C'est le résultat du développement des courants internationaux d'affaires et du **tourisme international** qui ne concernait que 25 millions de

personnes par an en 1950 et intéresse, suivant les estimations, de **700 millions à un milliard de personnes aujourd'hui**.

Le développement du fret aérien, et en particulier du fret express, est tout aussi spectaculaire. Dans une économie internationalisée de flux tendus, l'importance des délais d'acheminement pousse à la croissance de ce type de trafic dont on estime qu'il passera de 6 % à 40 % du trafic aérien de 2000 à 2015.

L'ensemble de ces flux de longue distance de transport des passagers et des marchandises se traduit, par surcroît, par des consommations d'énergie non négligeables. De plus, les trois grands opérateurs de fret aérien express disposent d'un réseau terrestre très diversifié pour assurer la distribution de ce fret.

On notera que les transports aériens sont totalement dépendants de l'approvisionnement en carburants liquides et que leur proportion dans la consommation de produits pétroliers augmente régulièrement malgré les efforts de l'industrie aéronautique mondiale.

c) Mécanismes de régulation de l'économie de marché mondialisée

Ce point est probablement **l'un des éléments essentiels d'une réflexion prospective sur le développement durable**.

Un système économique mondial nouveau s'est instauré depuis une vingtaine d'années sans que l'on en perçoive immédiatement tous les effets et qu'on puisse en distinguer les conséquences à des termes d'une ou deux générations.

Or, compte tenu du rapprochement des échéances tant en matière de changement climatique que de raréfaction des ressources de la planète, il est indispensable d'analyser de façon succincte les mécanismes de régulation de la mondialisation au regard de la nécessité de promouvoir une plus grande durabilité de développement sur la planète.

(1) L'autonomie croissante vis-à-vis des politiques

Le réseau mondial Internet, dont les États peinent à réguler les créations et à diriger la gouvernance, illustre l'indépendance croissante de la sphère économique mondiale vis-à-vis des États.

Certes, les plus puissants d'entre eux conservent encore un pouvoir sur l'économie ; mais c'est plus un pouvoir d'empêcher que de diriger ou même d'infléchir.

Ce pouvoir politique doit s'inscrire dans des limites de plus en plus étroites car la mondialisation des flux économiques s'est accompagnée, la création du marché unique européen et celle de l'OMC aidant, de la mise en

place d'un **corpus de normes juridiques internationales qui restreignent le champ d'intervention des États.**

En matière de développement durable, ce retrait de l'État de la sphère de l'économie peut avoir une conséquence fâcheuse. Les investissements nécessaires à la transition énergétique sont des investissements lourds qui impliqueront de s'exonérer d'un droit de concurrence de plus en plus exigeant. Et il n'est pas certain que les fondements juridiques de la réalisation de cette transition soient aujourd'hui acquis. Par exemple, on ne pourrait pas actuellement développer la filière électronucléaire française sur le même mode juridique que dans les années soixante-dix.

(2) Des traits dominants qui entravent la mise en place d'un développement durable

(a) La logique du marché

En premier lieu, il faut rappeler que la logique initiale de l'offre d'entreprise n'a que des rapports assez lointains avec la nécessité d'adopter un style de consommation plus raisonnée. Qu'il s'agisse de l'électricité, des voitures, de la téléphonie mobile ou des séjours de vacances, **le but des entreprises est de produire et de vendre plus, indépendamment des déséconomies externes que cela peut générer.** A côté de ce principe de base, les aspirations des consommateurs en faveur de l'éthique, des produits biologiques ou du commerce équitable et du développement durable pèsent encore bien peu.

(b) La logique financière

Il existe une contradiction de plus en plus marquée entre certaines structures de l'économie financière internationale et le développement durable.

Le poids des fonds de pension dans l'actionnariat résultant du vieillissement de la population et la pression nouvelle et constante, à l'échelon mondial, des instituts de notation ou d'évaluation des résultats des grandes entreprises, remodelent depuis quelques années les échéanciers de retour sur investissement et donc de recherche d'une **durabilité de développement ; or, celle-ci ne peut s'adosser qu'à des durées plus longues que l'annualité des conseils d'administration des entreprises, ou la quotidienneté des cotations des marchés financiers.**

(c) La logique des allocations de facteurs

En théorie économique, le flux du commerce international repose sur une division mondiale du travail, elle-même assise sur les différents coûts marginaux des facteurs de production.

Concrètement, cela signifie, pour chaque type de bien, qu'il sera produit dans les pays où ces coûts globaux de facteurs production (capital, travail, technologie) seront les moins élevés.

Ce mode d'organisation de la production a sa justification dans un système de marché ouvert au sein duquel une grande partie de la concurrence s'effectue sur les prix.

Mais cette gouvernance, par les coûts de facteurs, aboutit à générer des flux économiques, en contradiction avec les exigences d'une plus grande durabilité de développement. Comme de fabriquer pour le marché européen en Chine et de transporter de Chine des textiles qui pourraient être produits au Maghreb ou de pêcher des crevettes en Norvège et les faire décortiquer au Maroc pour les faire consommer dans le nord de l'Europe.

d) Un miracle de la « main invisible » du marché ?

Le principal mécanisme de régulation d'une économie de marché est l'ajustement de l'offre et de la demande par les prix.

En fonction de son élasticité par rapport aux prix, la demande de certains produits peut diminuer.

En d'autres termes, sur longue période, les comportements d'achat d'un pétrole à 100 \$ ou 300 \$ le baril **ne seront pas les mêmes que ceux d'un pétrole à 30 \$ ou à 50 \$¹.**

C'est la thèse principale d'un ouvrage publié en 1998 par Bjorn Lomborg (« *L'écologiste sceptique* »), qui estime que **les équations de prix seront (avec le progrès technologique) le plus sûr moyen d'asseoir un développement durable.**

Ce mécanisme de régulation par les prix pourrait être une des clés de régulation du système favorable à une durabilité de développement, en limitant les recours à des sources d'énergie de plus en plus chères.

Mais sa mise en jeu éventuelle pose plusieurs problèmes :

- il n'est pas applicable à tous les flux de la mondialisation. Par exemple, le transport maritime d'un produit textile fini en Chine jusqu'en Europe ne représente qu'un coût inférieur à 2 centimes

¹ Ce que semble confirmer le fait que les modèles économiques dont les relations sont assises sur un pétrole à 50 \$ ne fonctionnent plus avec un pétrole à 150 \$ le baril.

d'euro. C'est dire qu'avec un pétrole à 2 500 \$ le baril ce coût ne serait que d'un euro¹ ;

- la perception de l'augmentation des prix, et donc l'élasticité de la demande qui en découle, sont liées au degré de taxation du pétrole ; les Américains ont perçu beaucoup plus fortement la récente augmentation du pétrole que les Européens ;
- les variations de la demande face à une montée des prix dépendent du rythme de cet accroissement ; si la hausse des prix s'opère progressivement, la réaction de la demande est moins vive que si cette hausse s'effectue par paliers, comme l'ont montré les crises pétrolières de 1973 et de 1980 ;
- enfin, l'élasticité de la demande par rapport à une progression des prix a des limites sociales incontournables dans le court terme (nécessité du transport et du chauffage des bâtiments). Ces limites seront d'autant plus faibles qu'une offre de substitution au pétrole ou au gaz naturel existera.

e) La réintroduction des déséconomies externes dans le processus économique

De même que l'ajustement par les prix, la réintroduction des déséconomies externes dans le processus de décision économique pourrait être un des facteurs favorisant une plus grande durabilité du développement.

On connaît le mécanisme de Kyoto² qui consiste, pour les pays signataires, à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre de 5 % d'ici 2012 par rapport au niveau atteint en 1990. Cet objectif général de 5 % est décliné par zones géographiques : il est de 8 % pour l'Union européenne et de 7 % pour les États-Unis (qui ont signé le protocole mais ne l'ont pas ratifié).

Le protocole laisse les États libres des moyens à mettre en œuvre pour atteindre cet objectif, mais propose des outils à cette fin.

Le plus intéressant d'entre eux est la création d'un marché des émissions de CO₂ qui présente l'avantage de **réintroduire la déséconomie externe que constitue la participation de l'économie à l'accroissement de l'effet de serre dans les mécanismes du marché.**

Dans l'Union européenne, ce marché fonctionne sur la période 2005-2007 depuis le 1^{er} janvier 2005 ; chaque pays se voit attribuer un quota global

¹ Exemple cité par J-L Wingert dans « La vie après le pétrole » (Editions Autrement).

² Le protocole de Kyoto est entré en vigueur en novembre 2004. En novembre 2005, 157 États y étaient partie prenante.

d'émission de CO₂ qu'il ventile à son tour pour les établissements industriels (1140 en France).

Si ceux-ci dépassent leurs quotas, ils peuvent en acheter ou en vendre. Ils ont ainsi le choix entre la modernisation de leurs installations et l'achat de quotas d'émission.

Et au fur et à mesure que les objectifs de réduction des émissions de CO₂ seront plus ambitieux, la logique de marché devrait pousser les entreprises concernées à adopter des modes de production plus conformes au développement durable.

Il est clair aussi que le niveau de prix de la tonne de CO₂ – qui en 2005 a fluctué de 16 € à 28 € et qui s'est récemment effondré jusqu'à 11 € la tonne - pèsera sur les introductions de filières énergétiques de substitution.

Il s'agit donc d'un mécanisme qui pourrait infléchir le mécanisme de marché dans le sens d'un développement plus durable.

Mais cette espérance suscite en contrepoint plusieurs interrogations :

- la mise en place dans l'Union européenne du protocole de Kyoto ne concerne que l'industrie, c'est-à-dire seulement 30 % des émissions de gaz à effet de serre de l'Union,

- les Etats-Unis n'ont pas ratifié le protocole¹ et les pays asiatiques en voie de développement rapide (Chine, Inde) n'ont, aux termes du protocole, aucune obligation.

Ce qui a deux conséquences :

- d'une part, les zones dont l'activité est la plus menaçante pour le changement climatique sont, de fait, exclues des dispositions de Kyoto, ce qui limite la portée du protocole,
- d'autre part, cette absence de fait de la Chine, de l'Inde et des États pauvres, en particulier si les obligations du protocole sont renforcées pourra, à terme, **s'analyser comme une distorsion de concurrence de moins en moins acceptable dans une économie mondialisée.**

- enfin, si le marché des émissions de CO₂ peut être un levier fort pour encourager l'appareil économique à prendre en compte la durabilité du développement, sa **volatilité actuelle** (variation du prix des émissions de CO₂ de 1 à 2 en 2005) **ne donne pas une lisibilité à terme suffisante pour l'introduction de filières de substitution énergétiques.**

¹ *Même si certains États commencent à édicter des dispositions en la matière.*

f) Les interrogations sur les conséquences de la rupture technologique numérique

La mondialisation ne s'effectue pas à technologie constante.

Son essor a coïncidé avec la montée de l'Internet et du courrier électronique. Elle se poursuit parallèlement à l'introduction progressive des technologies numériques dans la société.

Au regard de la nécessité d'un développement durable, la question se pose de savoir quels pourraient être les effets de cette rupture technologique.

La réponse à cette question est difficile, et probablement prématurée.

Elle oscille entre l'observation que la révolution numérique est porteuse d'applications potentielles favorables au développement durable et le constat que les ruptures technologiques majeures développent toujours une nouvelle offre de biens et de services, comme cela a été, dans le passé, le cas de la machine à vapeur, de l'électrification ou du moteur thermique.

Dans un sens, un certain nombre d'applications des technologies numériques peuvent être de nature à économiser des détours de production coûteux : par exemple le télétravail, qui peut diminuer les déplacements automobiles pendulaires et éviter certains effets néfastes de la concentration urbaine. Il en est de même de la domotique, qui permettra une gestion numérisée plus économe des consommations d'énergie des bâtiments.

Mais, à l'opposé, on doit constater que la diffusion sociale d'Internet (dont l'usage est déjà estimé à environ 1 % des consommations d'électricité en France) n'a pas réduit le rythme de développement de l'économie mondiale¹, non plus que le courrier électronique n'a réduit les déplacements locaux ou internationaux. L'économie numérique a même suscité le développement de nouveaux biens de grande consommation dont le bilan écologique n'est pas nécessairement plus favorable que celui des objets qu'ils ont remplacés (entre le baladeur des années 80 et l'iPod, entre le lecteur de DVD et le magnétoscope, la différence est mince).

Dans une approche pessimiste on pourrait même estimer que la généralisation d'une économie individuelle du numérique renvoie à une plus grande liberté de comportements dont on sait, en l'état actuel des choses, qu'elle ne se traduit pas toujours par des consommations plus raisonnées en termes de durabilité de développement.

Mais **dans une approche plus optimiste** on peut penser que la révolution numérique n'en est qu'à ses débuts et que ses progrès permettront de poser les conditions d'un développement plus durable (*cf. infra IIIe Partie*).

¹ *L'économie américaine qui applique le plus ces techniques depuis une dizaine d'années est au contraire celle dont le PIB croît le plus parmi les pays développés.*

g) Des horizons temporels différents

(1) L'urgence de réhabiliter les temps longs

Dans le meilleur des cas, les choix politiques ou les décisions d'entreprises se prennent pour le lendemain, c'est-à-dire pour le moyen terme.

Cette vision classique est d'ailleurs actuellement ébranlée par des raccourcissements des cycles politiques et de la gouvernance d'entreprise qui privilégie de plus en plus les temps courts.

Or, une des caractéristiques du développement durable est qu'il s'insère dans des temps longs ou très longs.

Qu'il s'agisse de limiter les effets du réchauffement climatique ou de mettre en place des modes de fonctionnement sociaux plus économes en énergie, les **décisions prises aujourd'hui ne s'appliqueront qu'après-demain, et même au-delà.** Par exemple, changer la donne énergétique d'un pays, comme la France l'a fait avec la filière électronucléaire ou comme l'Allemagne tente de le faire en sortant du nucléaire suppose de prendre des décisions qui seront de pleine application trente ans après.

Dans un système d'organisation sociale et de mécanisme de décisions où les temps courts l'emportent, la mise en œuvre d'un développement durable doit retrouver des lignes de force qui réincorporent la nécessité de la durée dans la trame des décisions.

Mais ces décisions doivent aussi s'insérer dans une chaîne de comportements qui va des pouvoirs publics aux acteurs individuels de l'économie. Il ne suffit pas, par exemple, que les Gouvernements édictent des standards favorables à la production d'équipements ménagers plus économes en énergie et que les industriels proposent une offre ; il est aussi nécessaire que le citoyen consommateur prenne en considération cette offre.

(2) L'orchestration des constantes de temps divergentes

A chaque stade de leur promotion, **la mise en œuvre de modalités de développement plus durable se situe à la convergence de données physiques incontournables et de choix conscients dont l'horizon de réalisation n'est pas identique.**

Ceci vaut pour chacun des grands domaines concernés :

- les rythmes de la biosphère,
- le tempo de mise en œuvre des avancées scientifiques et de leur développement technologique,
- les règles de décisions de l'économie mondialisée de marché,

- et les multiples respirations de temps qui gouvernent l'inflexion des comportements sociaux.

(a) Les rythmes de la biosphère

Les temps de remise à l'équilibre des grands ensembles climatiques ne sont pas harmonisés :

- de 10 à 50 ans pour la biosphère continentale,
- de 50 à 250 ans pour le carbone des sols,
- de 5 à 50 ans pour l'océan superficiel,
- et de 1 000 à 2 000 ans pour l'océan profond.

Il en est de même, cela a déjà été noté, pour la durée de présence des gaz à effet de serre dans l'atmosphère :

- 120 ans pour le gaz carbonique,
- 8/12 ans pour le méthane,
- 110/120 ans pour le protoxyde d'azote,
- 45 à 100 ans pour les CFC,
- 3 200 ans pour l'hexafluorure de carbone.

Et ce tableau des temps de réaction de la biosphère donne la mesure d'un système dont la remise à l'équilibre dépend d'interventions humaines qui s'insèrent elles-mêmes dans des cycles de décision qui sont loin d'être synchroniques.

(b) Les progrès technologiques

Si l'on considère **les grandes avancées technologiques** :

- en matière d'énergie nucléaire, la mise en œuvre de l'EPR est à un horizon de 20 ans, celle de la génération IV de réacteurs qui permettra de multiplier par 50 les réserves de combustible n'interviendra pas avant 35 ans et, dans le meilleur des cas, les premiers résultats des premières recherches menées dans le cadre d'ITER sur la fusion thermonucléaire maîtrisée ne sont pas attendus avant cinquante ans, et le développement industriel d'une telle filière avant cent ans,
- dans le domaine du transport aérien, la réalisation d'une nouvelle famille de moteurs d'avion prend environ 15 ans à compter de sa décision de réalisation,
- dans le domaine des transports automobiles, il faut quinze ans pour renouveler la moitié du parc et vingt-cinq ans pour en renouveler la totalité,

- dans le secteur du bâtiment : en Europe, la durée de vie d'un bâtiment est souvent de 100 ans, et l'on estime à 1 % par an le renouvellement du parc résidentiel, et entre 1 à 2 % celui du parc d'immeubles consacrés aux services,
- dans le domaine des grandes infrastructures de transports, on bâtit un réseau d'autoroutes en trente/quarante ans, et la moitié d'un réseau de TGV en vingt-cinq ans.

(c) L'économie de marché

Les **règles du jeu de l'économie de marché** sur lesquelles reposent les décisions des entreprises aboutissent à des délais de validation de ces choix très variés : d'une seconde pour transférer des centaines de millions d'euros de Londres à Hong Kong, à quatre ou cinq ans pour lancer une nouvelle famille de produits.

(d) Les comportements sociaux

Les **durées d'inflexion des comportements sociaux** sont gouvernées par des variables différentes :

- l'**élasticité de la demande des consommateurs**, par exemple celle de carburant à la pompe, par rapport aux prix peut être quasi instantanée mais on sait qu'elle a aussi ses inerties et qu'elle se manifeste par paliers : le super à 1 €, à 1, 30 €, etc. ;
- l'**appropriation sociale des avancées technologiques** peut exiger des durées diverses : cinq ans pour la généralisation des téléphones portables, mais une génération pour la généralisation de l'usage des ordinateurs personnels et de l'Internet dans les pays occidentaux.

Et surtout, les horizons temporels qui commandent les décisions de consommation sont perçus très différemment : de l'instantanéité d'achats compulsifs à la réflexion qui précède le changement d'un véhicule ou l'achat d'un logement, ou l'équipement de sa maison en chauffe-eau solaire.

Mais dans la plupart de ces cas, la manifestation de ces comportements s'effectue dans **des cadres de décision temporels assez peu favorables au développement durable** puisqu'il s'agit de mettre en parallèle une satisfaction immédiate et un intérêt pour agir dont le bénéfice ne sera acquis individuellement qu'à l'issue d'une décennie, et collectivement à l'horizon d'une ou plusieurs générations. A moins que des catastrophes naturelles répétées ne conduisent à un changement profond de comportement sur ce point.

C'est pourquoi la compréhension par la population des problèmes – qui nécessite un vaste effort de communication scientifique et économique qui ne peut avoir d'effet que dans une société **réceptive à la culture scientifique technique et économique** est un levier indispensable à toute action politique dans ce domaine.

L'orchestration de ces différentes constantes de temps est un des enjeux majeurs de la promotion d'un développement plus durable.

*

* *

Aux termes d'une évaluation d'ensemble du modèle énergétique mondial et de ses perspectives d'évolution, on peut avancer les **conclusions suivantes** :

1. **Les conséquences du changement climatique à intervenir d'ici 2030** seront plus sévères que nous ne l'avions imaginé jusqu'ici, même si l'on réussit à réduire les émissions de gaz à effet de serre ; **elles seront beaucoup plus graves si la croissance de ces émissions se poursuit.**
2. Si la disponibilité théorique des réserves ultimes des ressources des principales énergies primaires que nous utilisons (pétrole, gaz) dépasse le siècle au rythme de consommation actuel, **l'échéance de leur raréfaction pourrait être beaucoup plus proche si la consommation mondiale continue à augmenter.**
3. A eux seuls, ces **deux premiers constats impliquent une transition énergétique forte et urgente.**
4. Or les principaux déterminants démographiques et économiques de la croissance mondiale à long terme laissent supposer un accroissement fort et continu de la demande de sources primaires d'énergie.
5. De plus, les logiques de l'économie mondialisée de marché entretiennent ce mouvement quoique certains de ses mécanismes (équations de prix, mise en place progressive mais limitée d'un marché des émissions de CO₂) soient à même d'en tempérer les impulsions.

Compte tenu de ces éléments, très préoccupants dans leur ensemble, mais aussi porteurs de futurs variables, il convient d'analyser les principaux scénarios d'évolution du modèle énergétique mondial à une génération, c'est-à-dire à l'horizon 2030.

DEUXIÈME PARTIE :

LES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES D'ICI 2030

La pente actuelle du modèle énergétique mondial **conduit à penser qu'en 2030 tout sera joué ou presque**. En fonction du déroulement des événements à venir en l'espace d'une génération, beaucoup des traits dominants de ce modèle seront acquis, sinon pour le reste du siècle, tout au moins pour les trente années qui suivront.

Mais l'éventail des possibles reste ouvert.

Des scénarios d'évolution différents peuvent nous conduire à des situations très différentes en 2030.

Toutefois, cette écriture de notre futur dépend d'abord de variables de commande qui pèseront fortement :

- le moment de l'approche du pic pétrolier, et l'ampleur du choc pétrolier qui s'ensuivra,

- le degré d'anticipation et la force du volontarisme politique, qu'il soit national ou international.

En fonction du jeu de ces éléments, trois grandes catégories de scénarios seront à envisager d'ici 2030 : la poursuite de la tendance ou le scénario du pire, la rétractation de l'économie mondiale ou la réussite de la transition énergétique.

I. LES VARIABLES DÉTERMINANTES

Le fonctionnement économique et l'organisation sociale de nos sociétés courent le risque d'être pris à contre-pied par le double mouvement décrit en première partie de ce rapport : celui d'un changement climatique plus accéléré et plus dévastateur qu'on ne se l'imagine aujourd'hui, mais aussi celui d'une raréfaction probablement plus accélérée de certaines des sources d'énergie primaire que nous employons.

Deux variables de commande qui sont liées vont éloigner ou rapprocher les curseurs de ces deux échéances : le pic pétrolier et l'ampleur ainsi que la précocité des mesures prises, directement et indirectement, contre les émissions de CO₂.

A. L'APPROCHE DU PIC PÉTROLIER

1. Les données du problème

Avant d'analyser les raisons pour lesquelles le pic pétrolier (et la déplétion pétrolière qui le suivra) sont une des variables directrices du modèle énergétique mondial, **il est nécessaire de lever deux préalables.**

Pourquoi le pétrole ?

Pourquoi le pic pétrolier ?

Sur le premier de ces points, on doit mentionner qu'il existe un discours, largement répandu, selon lequel l'humanité ne manquera pas de sources d'énergie primaire puisqu'il existe des possibilités de substitution au pétrole pour plusieurs siècles.

Selon ce schéma, dans un premier temps les réserves mondiales de charbon – qui excèdent deux siècles de consommation actuelle – pourraient se substituer au pétrole – fabrication de carburants de synthèse, possibilité de captation et de séquestration du CO₂, gazéification en méthane de certains gisements – ceci jusqu'à ce qu'une filière hydrogène, largement assise sur l'implantation des réacteurs nucléaires dits de génération 4, nous fournisse à la fois une énergie dont les réserves se chiffreront en milliers d'années et un vecteur d'énergie aussi souple que le pétrole.

Cette façon d'envisager le problème a sa légitimité, mais elle méconnaît trois réalités.

- Celle du caractère central de la source d'énergie primaire que constitue le pétrole dans une économie mondiale fondée sur la mobilité¹.

¹ Sans même évoquer le rôle industriel central de la pétrochimie qui mobilise annuellement environ 10 % des usages du pétrole.

- Celle de la durée des transitions de modèle énergétique et de l'ampleur de ces transitions. Pour n'en donner qu'un exemple, s'il fallait remplacer le pétrole utilisé par les véhicules aux Etats-Unis par l'hydrogène, cela exigerait la construction de 800 centrales de production d'hydrogène.

- Et celles des incertitudes technologiques qui pèsent encore sur certains aspects de l'utilisation d'énergie comme l'hydrogène.

S'agissant du pic pétrolier, les avis sont partagés.

Beaucoup rappellent qu'en 1950 on estimait qu'il serait atteint en 1970, et qu'en 1970 on pensait l'atteindre vers l'an 2000.

Certains estiment qu'il s'agit d'une échéance fictive, agitée par les compagnies pétrolières afin de justifier l'augmentation des prix.

D'autres enfin mentionnent que les réserves ultimes de pétrole dépasseraient l'horizon du siècle et que le problème n'est pas celui de la rareté, mais celui du prix du pétrole dont la hausse permettra d'activer les possibilités d'exploration. C'est la séquence – déjà mentionnée – du cycle « choc/contre-choc pétrolier ».

Cette orchestration d'antiennes rassurantes n'est plus pertinente. Pour une raison essentielle : le problème du pic pétrolier ne se résume pas à la taille du réservoir mais aux possibilités de débit du robinet. Et tout concourt à penser que ce débit va devenir rapidement insuffisant.

Pour résumer ce qui précède, le pétrole est un élément central de notre organisation économique et sociale, et cet élément indispensable va se raréfier.

Que peut-il alors se passer ?

2. Vers un pétrole à 150 dollars le baril ou plus

Au-delà du rythme classique du cycle du pétrole, l'exploration à l'horizon d'une génération (et peut-être moins) des confrontations de l'offre et de la demande de pétrole laisse penser que la **donne a changé**.

Il ne s'agit pas ici de fixer une date au pic pétrolier, **mais de mettre en évidence la lourdeur des tendances qui portent à la raréfaction de la ressource disponible au regard de sa demande et donc à la hausse de son prix.**

a) L'offre

Même si elle va être soutenue par l'augmentation des prix que nous ne faisons que commencer à enregistrer, l'offre de pétrole est appelée à stagner ou à n'augmenter que très faiblement.

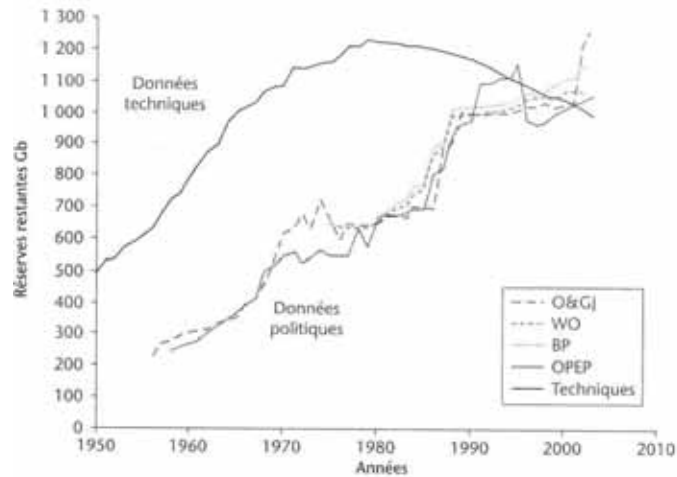
Plusieurs éléments conduisent à privilégier cette hypothèse plutôt que celle, plus lénifiante, d'une source d'énergie pétrolière dont la hausse des prix renforcerait progressivement la disponibilité.

D'une part, il faut revenir sur la réalité des réserves disponibles - c'est-à-dire des réserves prouvées et non des réserves qui seraient accessibles par l'amélioration technologique ou l'exploitation de gisements non conventionnels - c'est-à-dire de l'essentiel de la masse des réserves disponibles pour les vingt prochaines années.

Le graphique suivant met en évidence le croisement des courbes entre les réserves estimées sur la base des données techniques et les réserves déclarées politiquement¹. Le croisement de ces courbes s'effectue entre 1995 et 2000.

¹ *On sait maintenant que les États pétroliers, pour des raisons politiques, et les compagnies multinationales, pour des raisons comptables, ont surestimé leurs réserves. On ignore, surtout pour les premiers, dans quelle proportion.*

Données techniques et politiques des réserves mondiales de pétrole



Source : Jean Laherrère

D'autre part, sur une planète où les moyens technologiques d'exploration ont pourtant très fortement progressé en trente ans, on n'a plus fait de découvertes de grands gisements depuis 1965 (avec un pic très secondaire en 1975).

Ces deux éléments donnent à penser que, peu à peu, l'on se rapproche du pic pétrolier, c'est-à-dire du maximum d'extraction annuelle de pétrole de la planète.

Cette observation est indépendante du prix de ce pétrole – en tout cas à l'horizon d'une génération et probablement moins –.

Ce que tendent à établir les données géophysiques va être amplifié par la mécanique économique. Dans une ambiance de raréfaction de l'offre et d'accroissement de la demande (*cf. infra*), les **acteurs économiques majeurs du secteur auront intérêt à ne pas activer à l'excès la production pour bénéficier de prix à la hausse**. Ce qui, inversement, pourra présenter l'avantage de « lisser » la déplétion, c'est-à-dire la diminution du pétrole extrait qui suivra inévitablement le pic.

b) La demande

Au regard de cette atonie future de l'offre, la demande est appelée à progresser fortement.

Les scénarios de référence de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) pour 2030 estiment que, d'ici cette date, cette demande passera de 83 millions de barils par jour à 130 millions de barils par jour. Ceci sur la base

d'un taux de croissance de la demande de 2 % alors même que la croissance de la demande se situe à 2,4 % sur les cinq dernières années.

On a tenté d'analyser en première partie de ce rapport l'effet de la conjonction du maintien d'une croissance soutenue de la demande américaine et du caractère exponentiel de la croissance chinoise.

On peut donner deux autres types d'illustration de l'accroissement potentiel de la demande de pétrole.

Aujourd'hui, **environ 750 millions de véhicules circulent sur la planète. On prévoit qu'en 2030 ce nombre se situera autour de 1 400 millions de véhicules, soit un doublement.**

Et l'on doit s'arrêter, à nouveau, **au cas de la Chine**, dont la croissance est appelée à se poursuivre à peu près au même rythme pendant une vingtaine d'années et dont l'Inde réplique le modèle.

Quelques données brutes suffisent à mesurer le poids futur de cette croissance sur la demande mondiale de pétrole dans un pays dont on doit rappeler que 68 % de son énergie primaire sont fournis par le charbon :

- le revenu national chinois a doublé sur les cinq dernières années,
- sur la même période, le nombre de véhicules individuels a doublé,
- en 2005 ce nombre s'est accru de 40 %,
- en 2005, la Chine a construit 4 000 km d'autoroutes et prévoit d'en construire 7 000 km en 2006,
- chaque année, l'accroissement de la production de ciment chinoise correspond à la consommation annuelle des Etats-Unis, etc., etc.

Le pays, qui n'a que 15 ans de réserves pétrolières prouvées, consomme aujourd'hui 6 millions de barils de pétrole par jour. Selon les prévisions de l'AIE – qui paraissent sous-estimées¹ – il devrait en consommer 13 millions en 2030.

Au demeurant, les autorités chinoises sont conscientes du problème et s'efforcent à la fois de diminuer la dépendance au charbon (qui pose des problèmes de pollution de plus en plus difficiles à gérer politiquement), de développer les énergies non polluantes en CO₂ de toute nature et de renforcer leur efficacité énergétique (il est prévu qu'à l'issue du 11^e Plan quinquennal (2006-2011), l'efficacité énergétique par point de PIB augmente de 20 % par rapport à ce qu'elle était en 2001).

¹ *Probablement parce qu'elles reposent sur une diminution du taux de croissance actuel chinois, ce qui est loin d'être certain, en tout cas pour les quinze prochaines années. C'est un des enseignements que vos rapporteurs ont tirés de leur mission en Chine. La même remarque vaut pour les autres pays d'Asie.*

Mais, aux dires mêmes de ces autorités, le « mix » énergétique chinois qui employait 22,7 % de pétrole en 2005, en emploierait 22 % en 2020. Avec un PIB en croissance moyenne de 8,5 % en quinze ans (10,1 % en 2005), le maintien de ce pourcentage aboutirait à multiplier la demande chinoise de pétrole par 3,4.

Or, on peut déduire de ce qui précède que la confrontation d'une offre dont les capacités durables d'accroissement prêtent fortement au doute et d'une demande dont on ne voit pas qu'elle ralentisse engendrera des effets de prix dévastateurs à un horizon de dix à quinze ans.

c) Des effets de prix dévastateurs

(1) Les mécanismes

La mise en parallèle d'évolutions contrastées de l'offre et de la demande de pétrole conduit à se poser **le problème des effets de prix que générera cette confrontation à un horizon de 15 à 20 ans.**

Certes, il existe des tempéraments à ces évolutions : du côté de l'offre, un accroissement des possibilités d'extraction générées par la technologie, du côté de la demande des possibilités de diminution du fait des politiques d'économie ou de la montée de comportements individuels plus restrictifs du fait de la hausse du prix.

Mais le déséquilibre qui s'est amorcé en 2001 et qui se renforcera entre ces deux éléments du marché est trop fort pour que l'on n'aboutisse pas, dans un futur plus proche qu'on ne l'imagine, à un choc pétrolier de grande ampleur.

Il est difficile de conjecturer sur le déroulement de ce choc : accroissement progressif, montée par à-coups plus violents, ou hausse très brutale. Mais on peut raisonnablement penser **qu'il portera le baril de pétrole rapidement à 100 \$, puis à un niveau proche ou supérieur à 150 \$ le baril dans un délai de dix à quinze ans.**

En effet, les données de base du marché recèlent des facteurs autonomes de poussée à la hausse :

- La faiblesse des marges de manœuvre

Actuellement, les stocks sont au plus bas et les possibilités de réponse du marché à la hausse de la demande se situent autour d'un million de barils par jour, soit 1,2 % du volume du marché (par rapport à une demande qui croît annuellement de 2,4 % et qui augmentera à moyen terme).

- L'inadéquation relative des huiles extraites et des huiles demandées

L'AIE estime que beaucoup des gisements qui seront mobilisables à l'avenir sont des gisements de pétrole lourd alors que la demande comprend une forte demande de pétrole léger (par exemple, le diesel est très peu utilisé en Chine et aux Etats-Unis pour les véhicules individuels). Cette inadéquation exige une longue réadaptation de l'appareil de raffinage et donc du parc automobile mondial alors même qu'actuellement ceux-ci sont déjà inadaptés aux configurations de la demande.

- La cotation en continu

Entre son extraction et la pompe, un litre de pétrole fait l'objet de 90 transactions financières ; entre ces deux moments, il a été coté en continu sur le marché.

A l'approche du pic pétrolier et dans un contexte de déséquilibre structurel de l'offre et de la demande, ce mécanisme de cotation en continu créera des anticipations spéculatives fortes, amplifiées par rapport à celles que l'on constate déjà aujourd'hui.

- Le risque politique

Le prix du pétrole est exagérément sensible aux événements politiques. La période récente en a fourni beaucoup d'illustrations : un discours d'un président sud-américain ou des affrontements interethniques au Nigeria font monter la cote. Il en est de même de toute inflexion de la stratégie d'utilisation de ses matières premières énergétiques par la Russie.

Mais, sur ce point, on sait que le risque majeur réside dans le fait qu'une grande partie du pétrole exporté, et deux tiers des réserves mobilisables¹, se situent au Moyen-Orient, dont les données géopolitiques ne se caractérisent pas par une grande stabilité.

Une crise dans ce secteur géographique aurait des effets d'accélération assez puissants sur les prix.

Par exemple, l'Iran exporte 2,5 millions de barils par jour (1,6 à destination de l'Asie et 0,9 à destination de l'Europe). Si on réfère, et pour ce seul pays du Moyen-Orient, le chiffre de ses exportations à la marge de manœuvre mondiale actuellement disponible (1,2 million de barils par jour), on conçoit l'effet que pourrait avoir sur le marché pétrolier une crise politique importante impliquant l'Iran (les tensions actuelles, qui ne sont pas majeures, ont porté le prix du baril de 65 \$ à 75 \$ au mois d'avril 2006, soit plus de 13 % de hausse).

¹ *Hors pétrole non conventionnel.*

Sur cette base, on hésite à chiffrer la hausse qu'impliquerait une crise politique en Arabie Saoudite...

A cette mention de l'instabilité politique propre à la région, on doit ajouter le fait – comme le montre, par ailleurs, la crise avec l'Iran – qu'un niveau élevé du prix du pétrole facilite son utilisation comme moyen de pression politique.

(2) Les conséquences

Aussi bien le déséquilibre structurel de l'offre et de la demande que les facteurs d'accélération propres à la mécanique du marché du pétrole portent à penser que le prix de cette source d'énergie primaire va s'accroître fortement à un horizon d'une génération.

Mais un pétrole à 150 \$, serait-ce si grave ?

Certains soulignent qu'un pétrole à plus de 70 \$ le baril est encore inférieur au taux atteint, en francs constants, à celui du début des années 80, qui correspondait à 80 \$ le baril. Ils font observer que ce niveau de prix de la ressource n'empêche pas actuellement l'économie mondiale de progresser.

Il convient de tempérer cet optimisme par plusieurs types de considérations.

L'augmentation de 30 \$ à 60 \$ le baril a correspondu à une ponction de l'ordre de 0,4-0,5 point de PIB pour les économies de la zone euro¹. **Soit pour des taux de croissance moyens qui n'excèdent pas 2 %, des prélèvements de l'ordre de 20 à 25 % sur la croissance.**

Si on raisonne de façon linéaire, un pétrole à 120 \$ le baril aurait un impact de 1,5 point de PIB sur des économies à faible croissance si elles n'y étaient pas préparées. Soit un prélèvement des trois-quarts qui ne laisserait subsister qu'une croissance résiduelle de PIB de 0,5 %. **A 150 \$, tout effet de croissance serait annulé sauf modification de la politique industrielle mise en place auparavant.**

Ajoutons que les simulations portent sur une hausse temporaire et non sur un niveau durable de prix élevés de l'énergie.

Par ailleurs, et au-delà de cette menace réelle sur nos équilibres macroéconomiques, on doit considérer qu'un pétrole à 150 \$ le baril aurait des effets individuels très lourds sur notre organisation sociale actuelle, comme le transport automobile individuel, le fret de marchandises ou le chauffage. Le passage du prix du baril de 30 \$ à 60 \$ a déjà eu des effets dans ces domaines.

¹ Cf. Rapport d'information du Sénat, précité, n° 105 du 24 novembre 2005 : La hausse des prix du pétrole : une fatalité ou le retour du politique ?

Au total, avec un pétrole à 150 \$ le baril, on entrerait dans un changement de monde économique et social, avec, de façon sous-jacente, la certitude que la disponibilité et le prix de la ressource centrale que constitue le pétrole continueront de toute façon à se détériorer.

Il revient donc au volontarisme politique de préparer ce changement d'époque, les mécanismes du marché ne permettant pas de faire face à l'enjeu du développement durable et de la transition énergétique.

B. L'AMPLEUR ET LA PRÉCOCITÉ DES RÉPONSES POLITIQUES

1. Les réponses nationales

Gouverner, c'est prévoir.

Tant en matière de limitation des émissions de gaz à effet de serre que de préparation du choc pétrolier qui s'esquisse, les réponses politiques et leur préparation sociale seront décisives.

Et une information claire et objective est un préalable à cette action.

Les réponses possibles ont des expressions individuelles qui relèvent de réactions à la montée des prix de l'essence ou du fuel à la pompe que la hausse actuelle du pétrole a commencé à susciter. Elles s'adosent aussi à des comportements plus civiques, peu à peu générés par la prise de conscience des dangers du développement de l'effet de serre pour la planète.

Mais elles doivent être fédérées par un volontarisme politique, ceci pour deux raisons :

- **D'une part**, le fait que le monde dans lequel nous évoluons est en passe de changer durablement justifie que les États mènent des actions d'une plus grande ampleur que celles qui pouvaient résulter de l'agrégat de l'évolution des comportements individuels.

Par exemple, encourager la montée de filières de substitution fondées sur des énergies renouvelables ne peut que reposer sur un faisceau d'actions économiques, fiscales, législatives et normatives qui relèvent de la puissance publique.

Relève aussi de l'État la définition d'objectifs et la mise en place de relais d'application de cette politique – en particulier auprès des collectivités territoriales. Comme en relève également la prise de conscience énergétique grâce à une information systématique du public – en commençant par l'école, en s'appuyant sur le tissu associatif et en incitant les médias à remplir leur rôle, en formant les personnels concernés (architectes, bureaux d'études, élus locaux, etc.) –.

Dans le domaine qui nous préoccupe, les enjeux et l'ampleur du chantier sont de la dimension des projets de reconstruction menés après la guerre.

• **D'autre part**, parce que se posent les problèmes de la gestion du temps et de la recherche de consensus sociaux.

Car même si les échéances en matière de changement climatique et de raréfaction de la ressource pétrolière sont probablement beaucoup plus proches qu'on ne l'envisage communément, elles demeurent lointaines puisqu'elles se situent à des horizons de temps supérieurs à ceux des échéances électorales ou des prévisions de cotation en bourse.

Or, comme cela a été souligné dans la première partie de ce rapport, **dans le domaine du développement durable il s'agit de décider aujourd'hui pour le surlendemain.**

Cela suppose probablement la recherche préalable d'un consensus assez large pour que les décisions qui prendront effet dans cinq à vingt ans ne soient pas remises en cause par les aléas du cycle politique, et donc empêchées d'être mises en œuvre du fait des impopularités provisoires qu'elles pourraient susciter.

Cette recherche de consensus est indispensable car les évolutions à accomplir pour s'adapter au monde qui vient seront malaisées.

Mais c'est à ce prix que notre pays pourra surmonter les chocs énergétiques qui s'annoncent et contribuer plus activement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

2. Les réponses internationales

Si une prise de conscience nationale précoce suivie d'une application dans la durée peut lisser les effets du choc pétrolier à venir, le changement climatique excède le cadre des réponses nationales.

Or, en l'état, **l'économie de marché mondialisée**, même si certains de ses ressorts (élasticité de la demande de consommation par rapport aux prix, réintroduction des déséconomies externes dues aux émissions de CO₂ par des mécanismes du style de ceux de Kyoto) peuvent infléchir le développement dans un sens plus durable, **ne constitue pas un cadre idéal pour lutter contre les causes du changement climatique.**

Ni ses arbitrages en faveur des temps courts par rapport aux temps longs du développement durable, ni sa mécanique qui repose sur une concurrence largement assise sur les prix ne sont, en l'état des réponses internationales, propices à l'établissement d'un développement durable.

A cet égard, on doit présenter deux observations sur deux institutions internationales qui régulent, pour partie, le système : **l'Organisation mondiale du commerce (OMC) et la Commission européenne.**

Il n'est pas de la vocation de l'OMC de régler les problèmes de développement durable.

Mais, et sans cruauté excessive, une consultation de la page de présentation de son site montre, qu'au-delà de la photo souriante de son président et d'éléments intéressants sur l'agenda du cycle de Doha, elle se préoccupe du changement climatique, non pas pour analyser l'accélération de ce changement du fait des règles du commerce international, mais seulement pour évaluer, dans un rapport fait par son état-major, les effets des accidents climatiques sur le commerce international¹ !

Une exploration plus poussée du site montre que ni le développement durable, ni les effets du changement climatique ne font partie des centres d'intérêt de l'organisme.

De façon plus sérieuse, très vite il faudra tenir compte **des distorsions de concurrence appelées à s'amplifier. Les pays qui prennent et appliquent des mesures coûteuses en termes de lutte contre le changement climatique doivent être protégés contre ceux qui ne le font pas.** Car des règles valables lorsque ces distorsions entre les coûts de production et de services n'existent pas ne le sont plus.

Certaines des directions générales de la Commission européenne mènent des politiques favorables au développement durable en matière de recherche, d'édiction de directives – en particulier sur l'efficacité énergétique –, d'expérimentation de modes de transport ou de prises de position dans le processus de Kyoto.

Mais dans d'autres domaines, **les pratiques de la Commission n'ont pas pris en compte le défi du changement climatique.**

Le cas le plus parlant est celui de l'énergie.

Dans ce domaine, qui relève encore largement des États, la Commission a publié un « Livre vert » plaidant pour une unification des marchés, la sûreté et la durabilité des approvisionnements énergétiques de l'Europe.

Toutefois, l'action principale mise au service de cette politique est la politique de la concurrence, sans tenir le moindre compte des dégâts résultant de la croissance des coûts externes liés à l'effet de serre. **Ceci revient à promouvoir une politique d'énergie bon marché contraire, de toute évidence, à une prise de conscience par les citoyens et les acteurs économiques européens des nécessités d'un usage parcimonieux et durable de cette énergie dès lors qu'il s'agit du mauvais usage des matières premières fossiles à usage énergétique.**

¹ Cf. *Staff working papers « The impact of disasters on international trade ».*

Il serait souhaitable que la Commission – qui fait, par ailleurs, œuvre utile dans le domaine du développement durable – puisse, sur ce plan, mieux prendre en considération les effets pervers de la mise en œuvre de certaines de ces politiques.

*

* *

II. LES SCÉNARIOS ENVISAGEABLES D'ICI 2030

Dans deux domaines centraux de notre vie économique et sociale, les effets du changement climatique et la montée du prix du pétrole, les échéances se rapprochent.

L'évolution de ces deux éléments climatiques et économiques, même s'ils ont leurs rythmes propres, sera convergente.

Que ces événements évolueront de façon séculaire n'implique pas qu'ils ne nous affecteront pas fortement d'ici moins d'une génération.

Très rapidement, à l'échelle de l'histoire, notre monde va connaître des changements de l'ampleur de ceux qu'il a enregistrés à l'occasion de chacune des révolutions industrielles qui ont marqué les deux siècles qui nous précèdent. Avec une accélération propre à notre temps.

On a vu également qu'en fonction des variables de commande du modèle énergétique mondial le poids de ces tendances lourdes pouvait s'amplifier ou se réduire – dans le domaine du prix du pétrole comme en matière de changement climatique.

Quels sont alors les scénarios envisageables d'ici 2030 ?

Compte tenu de la difficulté de l'exercice¹, il ne s'agit pas de décrire précisément un avenir prédéterminé, mais de tracer brièvement les grandes typologies de ce que pourraient être les assises et les formes du développement à un horizon lointain, mais encore perceptible, celui des années 2020-2030.

Et parmi ces futurs possibles, on peut en distinguer trois :

- la poursuite de la tendance ou la perspective du pire,
- la rétractation de l'économie mondiale,
- le dépassement de la crise par la réussite de la transition énergétique.

¹ *Il suffit, pour mesurer cette difficulté, de se rapporter aux travaux des prospectivistes et des futurologues publiés dans les années soixante-dix sur le monde de l'an 2000.*

A. LA POURSUITE DE LA TENDANCE OU LA PERSPECTIVE DU PIRE

Quel pourrait être l'état de notre planète en 2030, si la tendance actuelle se poursuivait ?

Si les politiques nationales de promotion d'une production et d'une utilisation plus durable de l'énergie n'étaient ni renforcées, ni généralisées ?

Les tentatives du cycle de Kyoto de réinsérer la déséconomie externe menaçante que constitue la croissance des émissions de gaz à effet de serre dans les mécanismes de l'économie de marché avaient alors échoué au niveau mondial, malgré certains progrès en Europe.

En d'autres termes, le bateau continuerait sur son erre d'aggravation des effets du changement climatique et de renchérissement de la ressource pétrolière.

L'état de la planète serait alors caractérisé par une partition accentuée des économies et des sociétés et un renforcement des tensions.

1. Une partition accentuée des économies et des sociétés mondiales

C'est un constat d'évidence, les économies mondiales sont inégalitaires et fonctionnellement très segmentées. Entre elles et à l'intérieur de chacune d'elles. La mondialisation récente de l'économie ayant dans certains cas accru ces caractéristiques et dans d'autres les ayant réduites.

Il est à craindre que la poursuite de la tendance actuelle ne renforce ces traits dominants de segmentation et d'inégalité.

Face à la double contrainte que vont représenter la montée des aléas et des coûts du changement climatique et la progression des prix du pétrole, **les nations, les professions et les organisations sociales ne seront pas égales.**

Globalement, il est certain que la plupart des États les plus pauvres seront les plus pénalisés par les perturbations climatiques, n'y étant ni préparés par leur tissu administratif, ni par leurs infrastructures, ni par leurs capacités financières.

Dans cette approche, **une première observation s'impose.**

La moitié de l'humanité, qui a déjà eu du mal à suivre le cours de la mondialisation parce qu'elle était restée à l'écart du mouvement de développement qui a suivi la décolonisation, sera de plus en plus marginalisée.

Des économies, pour lesquelles le pétrole à 30 \$ se vendait au litre, et qui subissent le contrecoup d'un pétrole à 60 \$, ne pourront pas résister, en dépit de la rusticité de certaines d'entre elles, à l'impact d'un baril à 150 \$.

De plus, ces sociétés qui subissent déjà les effets d'aléas climatiques de grande ampleur (sécheresse, modification des biotopes, inondations, typhons, etc.) sans pouvoir leur apporter de réponses vont indubitablement souffrir de l'aggravation des conséquences du changement climatique.

Mais qu'en sera-t-il des sociétés plus développées ?

Une réponse d'ensemble consiste à estimer qu'en fonction du degré de développement, ces sociétés, même si elles ne sont préparées ni à l'aggravation des effets du changement climatique, ni aux conséquences de la montée des prix du pétrole, trouveront peu à peu des réponses à ces deux contraintes, faute de l'avoir fait plus tôt.

Mais il y a peu de chances que ces adaptations s'engagent sur la base de schémas « gagnants-gagnants ».

Le changement climatique aura des coûts économiques et sociaux qui s'ajouteront à ceux générés par la hausse du prix du pétrole.

Et suivant le secteur économique, suivant la place du pétrole dans la production de valeur des branches, suivant la localisation des acteurs économiques, suivant la dotation des infrastructures des transports en commun, suivant la capacité financière des entreprises ou des particuliers à s'assurer contre les coûts du changement climatique, suivant leur revenu **il y aura des gagnants et des perdants.**

Par ailleurs, les capacités des États, même les plus développés, de cicatiser le tissu social seront limitées par les coûts croissants du changement climatique.

Les sociétés développées deviendront donc encore plus segmentées et plus inégalitaires qu'elles ne le sont.

2. Le renforcement des tensions

a) Sur le plan interne

Cette aggravation des tensions risque d'être perceptible dans deux domaines.

Sur le plan interne, les **sociétés plus inégalitaires et plus segmentées connaîtront des problèmes de cohésion sociale aggravés.**

La partition sociale que l'on constate déjà entre les secteurs de l'économie qui ont pu répondre à la division internationale du travail que la mondialisation a exacerbée, et ceux qui n'ont pu y répondre, s'accroîtra.

D'autre part, il est à craindre que des sociétés plus segmentées et plus inégalitaires connaissent des tensions politiques fortes.

b) A l'échelon international

En matière internationale, la poursuite de la tendance aurait deux conséquences.

- **D'une part**, il va être difficile de maintenir la juxtaposition qui s'esquisse entre les pays qui prennent des mesures pour lutter contre l'effet de serre et ceux qui s'en désintéressent, qu'il s'agisse dans ce dernier cas des Etats-Unis ou de pays en voie de développement accéléré comme la Chine ou l'Inde.

Les distorsions de concurrence qui pourraient résulter à terme de ces différences de comportement vis-à-vis du changement climatique pourraient aboutir à des tensions en matière commerciale.

L'inertie de l'OMC dans ce domaine risque de faire voler en éclats l'organisation du commerce international. Avec de forts risques de régressions économiques.

- **D'autre part**, en fonction de la perception de la raréfaction progressive des ressources pétrolières et gazières, on assistera à **un durcissement des stratégies d'accès à ces ressources, durcissement qui pourrait aboutir à des conflits armés.**

B. LA POSSIBILITÉ D'UNE RÉTRACTATION DE L'ÉCONOMIE MONDIALE

Que l'on déplore ou non la façon dont elle s'opère, la croissance du commerce international est depuis un demi-siècle un des moteurs de l'économie mondiale.

A l'horizon 2020-2030, la question peut se poser de savoir si la raréfaction d'une énergie souple, disponible et bon marché, jointe au coût croissant des catastrophes, donc des assurances, ne va pas aboutir à une rétractation de l'économie mondiale.

Il existe beaucoup d'incertitudes sur ce point, mais deux interrogations majeures doivent être mentionnées. Elles concernent principalement le rôle et la configuration du transport et le bouclage économique et financier de l'économie mondiale.

1. Le rôle et la configuration du transport

C'est toute la chaîne du transport du commerce international qui sera affectée par l'augmentation du prix du pétrole : aérien, maritime, routier.

Le renchérissement du transport international direct, de port à port ou d'aéroport à aéroport sera naturellement affecté par la hausse du prix du pétrole.

Mais il ne le sera qu'en proportion du rapport entre la valeur des objets transportés et le prix de ce transport. Si le pourcentage de ce prix est marginal dans la valeur des objets, il est peu probable que la hausse du prix joue un rôle limitatif. On a cité, dans la première partie de ce rapport, l'exemple d'un produit textile dont le prix de transport international est de l'ordre de 2 centimes d'euro.

Un doublement du prix du pétrole ne remettrait pas en cause les flux commerciaux qui se sont établis, dans ce secteur, entre la Chine et le reste du monde.

Il ne remettrait en cause non plus le transport aérien de disques de microélectronique et encore moins le transfert de données informatiques entre les filiales mondiales d'une entreprise.

A l'opposé d'autres secteurs, comme les produits intéressant le tourisme, l'agriculture ou la pêche, seront beaucoup plus affectés.

Mais plus que les transports internationaux, ce seront les transports dérivés qui pourraient souffrir d'un accroissement des prix du pétrole. Et ceci dans deux domaines :

- les transports routiers, à chacun des bouts de la chaîne logistique du commerce international,
- les transports multiples permettant de profiter des différences mondiales ou continentales des coûts de facteurs de production dont une illustration a déjà été donnée : celle des crevettes pêchées en Mer du Nord pour être décortiquées au Maroc et revendues sur le marché européen.

Dans ces deux derniers cas, ce sont les mécanismes de base d'une économie mondiale fondée sur la souplesse, les différences de coût de facteurs de production et le fonctionnement en flux tendus qui seront atteints.

2. Le bouclage économique et financier du système

Quelles pourraient être les conséquences économiques et financières d'un pétrole à 150 \$ le baril ou plus sur les équilibres généraux de l'économie mondiale ?

Le ressaut d'un pétrole à 30 \$ le baril à un pétrole à 150 \$ le baril se traduit – à structures de consommation d'énergie égales – par un pourcentage de prélèvement sur les PIB des pays consommateurs de 2 points.

Soit, pour un PIB mondial de l'ordre de 40 000 milliards de dollars en 2030, une altération de la demande des pays consommateurs de 800 milliards de \$.

Or, la contrepartie de cette altération est l'augmentation des avoirs des pays exportateurs de pétrole.

Cela revient à revisiter le problème du recyclage des pétrodollars des années soixante-dix avec une ampleur plus forte. Et, compte tenu de la taille démographique relativement modeste des pays exportateurs, on peut conjecturer que la demande économique de ces pays ne pourra compenser la diminution de la demande des pays importateurs. C'est du moins ce que l'on a observé après les deux chocs pétroliers qui ont abouti à un ralentissement de l'économie mondiale jusqu'au contrechoc pétrolier du milieu des années quatre-vingt.

Il y a donc, à l'horizon 2030, un risque important de rétractation de l'économie mondiale.

C. LA RÉUSSITE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Les données qui précèdent sont claires.

Le modèle énergétique introduit par la seconde révolution industrielle du début du siècle dernier n'est pas pérenne.

A l'horizon de moins d'une génération, son extension actuelle est porteuse de menaces sur la croissance économique, de troubles de la cohésion sociale et d'aggravation des tensions internationales. Elle contribue, en outre, à accélérer le changement climatique alors même que l'ombre portée du stock de gaz à effet de serre aura des effets beaucoup plus lourds que ceux que nous commençons à subir, probablement supérieurs à celui des effets d'un pétrole à 150 \$ le baril.

Faire évoluer le modèle énergétique mondial est indispensable et urgent.

C'est l'enjeu de la transition énergétique, dont le but est de nous préparer aujourd'hui aux changements qui interviendront d'ici moins d'une génération.

Faut-il vraiment s'y préparer ?

D'aucuns pensent que les adaptations se feront progressivement sur la base du renchérissement du prix de l'énergie et de l'introduction spontanée des avancées scientifiques et technologiques. Et qu'il n'est donc pas nécessaire de mettre à mal les assises de nos économies pour répondre à des événements auxquels nous saurons nous adapter.

Cette façon d'envisager les choses ne prend pas la mesure de l'ampleur du changement nécessaire. Faire évoluer nos modes de production et nos usages de l'énergie dans un délai de dix à vingt ans est techniquement et économiquement difficile. Ceci ne peut être fait qu'avec le soutien massif de l'opinion publique et au prix d'une volonté politique ferme, contenue et audacieuse.

Car il faudra surmonter trois catégories d'inertie :

- **En premier lieu, l'inertie de la vitesse acquise.**

Aussi bien en matière de transports que d'usages résidentiels de l'énergie, les équipements publics et privés ne sont pas préparés à la transition énergétique. Qu'il s'agisse de l'état du parc immobilier destiné aux services et à l'habitation, du parc de véhicules individuels ou de fret, des types d'implantations urbaines, d'infrastructures de transports, l'ensemble de l'équipement de notre territoire est, malgré quelques adaptations, plus calé sur le modèle énergétique actuel que sur celui de la transition à venir. Adapter ces équipements à la nouvelle donne prendra du temps.

- **Ensuite, l'inertie de l'avancée des progrès scientifiques et technologiques**

On l'a vu avec la filière électronucléaire, changer de modèle énergétique prend vingt à trente ans. De même, mettre en place la moitié d'un réseau de train à grande vitesse a exigé vingt-cinq ans. Encore doit-on ajouter, dans ces deux cas, qu'il s'agissait d'efforts menés de façon centralisée par la puissance publique et qu'il a été facile d'imposer aux usagers, et non d'un changement plus diffus impliquant une modification des pratiques sociales.

- **Enfin, l'inertie des mentalités**

Adapter les gestes de notre vie quotidienne à un usage plus mesuré de l'énergie requiert du temps. Et quoique cette évolution puisse être accélérée par la hausse du prix de cette énergie, cette adaptation ne se fera pas *sui generis* mais exigera du temps et de l'action publique, qu'il s'agisse d'éducation, d'information ou d'incitation.

La préparation de la transition énergétique ne peut donc pas s'improviser. **Mais ce qui est sûr, c'est qu'avant 2020 les pays qui se seront impliqués de façon consciente et suivie dans cette démarche – qui excède de beaucoup les mesures actuellement prises – seront socialement et économiquement gagnants.**

*

* *

En définitive, les scénarios énergétiques envisageables à l'horizon 2020-2030 font apparaître :

1. que la poursuite de la confrontation d'une offre limitée et d'une demande en forte croissance **aboutira à un choc pétrolier portant le prix du pétrole à 150 \$ le baril, et peut-être au-delà, d'ici moins d'une génération,**
2. que tout essai de pérennisation du modèle énergétique actuel aura pour résultat **une rétractation de l'activité économique mondiale, une diminution de la cohésion sociale des Etats et une aggravation des tensions internationales,**
3. **qu'il faut dépasser cette crise qui s'annonce en préparant la transition énergétique qui s'imposera à nous de façon d'autant plus dure que nous aurons tardé à l'anticiper,**
4. que, compte tenu de l'ampleur des inerties à surmonter, **il faut la préparer dès maintenant,**
5. **que ce chantier est de la responsabilité politique.**

TROISIÈME PARTIE :

L'APPORT DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE À LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le constat effectué sur le modèle énergétique mondial et ses scénarios d'évolution à l'horizon d'une génération montrent clairement **l'urgence de décisions en matière de politique énergétique.**

Le défi est simple : il faut avoir mis en place avant 2020 un modèle énergétique pertinent dans chaque pays, mais également à l'échelon planétaire.

Qu'est-ce qu'un modèle pertinent en matière de développement durable ?

C'est une architecture de production et d'utilisation de l'énergie qui permet de poursuivre notre développement en répondant à **une triple exigence :**

- **réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre,**
- **utiliser de façon plus parcimonieuse des ressources fossiles qui se raréfient,**
- **et proposer dans ces deux domaines des alternatives cohérentes** avec l'organisation de nos économies et de nos pratiques sociales, ce qui n'exclut pas d'infléchir ces dernières par des interventions de la puissance publique pour orienter les marchés en faveur du changement qu'exige la protection du futur.

Au regard de ces trois conditions, les modèles et les réponses de chaque pays peuvent être diversifiés. Car il n'existe pas de modèle énergétique unique.

Par exemple :

- les pays dotés en charbon (Chine, Etats-Unis, Inde, Australie) pourraient, à terme, privilégier les filières de captation-séquestration du CO₂ en vue d'assurer une production d'électricité sans émission de gaz à effet de serre.

- les pays à fort potentiel agricole devront choisir entre la production de biomasse destinée aux carburants, les autres usages non alimentaires et les productions alimentaires.

La transition énergétique reposera donc sur des solutions qui seront différentes dans chaque pays.

Mais, **même dans chaque pays, cette transition ne pourra pas reposer sur une filière unique.** Par exemple, un pays comme la Suède, qui est revenue sur son moratoire électronucléaire, va concilier l'emploi de cette filière avec l'usage massif de biocarburants et d'énergies issues de la récupération des déchets.

Par delà la pluralité des modèles nationaux de développement énergétique durable, **il faut aussi que ces modèles répondent à une cohérence à l'échelon planétaire**, ce qui signifie que les règles du commerce international ne doivent pas pénaliser les pays les plus actifs dans le secteur du développement durable planétaire.

La science et la technologie peuvent-elles nous aider à répondre à ce défi ?

Bien sûr, à condition de considérer comme une priorité la recherche dans les domaines clés. Les sociétés humaines ont toujours su trouver des réponses à leurs problèmes. La difficulté est liée à l'importance du facteur temps.

L'essentiel des voies de recherche et des solutions envisageables est connu. Mais les durées d'évolution d'un système économique encore totalement dédié à l'usage des carburants fossiles sont grandes et la nécessité d'une action urgente et massive est peu perçue par la population – et encore moins par la plupart des responsables politiques du concert des nations.

La conviction de l'ensemble des scientifiques et organismes qui étudient les questions du changement de climat est que l'urgence d'une action volontariste – une volonté politique – est aiguë. Que les échelles de temps qui verront se développer des dérèglements climatiques dévastateurs sont plus courtes que ce qui résulte des modèles.

Ainsi, par nature, ne peuvent être pris en compte que des phénomènes dont l'ampleur est mesurable avec une faible marge d'erreur. Or, tous ces phénomènes vont vers une aggravation forte des pergélisols de hautes latitudes – fonte de glaces polaires et diminution d'albédo – évolution des émissions fortement accrue dans les pays émergents (les courbes ont tendance à rester exponentielles plus que prévu et non pas linéaires).

Mais, par éthique, les scientifiques, tant qu'ils ne sont pas sûrs, n'aiment pas jouer les Cassandre et par conséquent pratiquent le principe de précaution à l'envers : s'ils pensent que le danger est grand, mais ne peuvent affirmer qu'il sera catastrophique dans cinq ans, ils restent dans le flou sur les délais.

Pourtant, une transition énergétique nécessaire et difficile est possible. Et sur ce point :

- **les propositions de la science et de la technologie sont multiples,**
- **les fortes contraintes qui pèsent sur l'introduction de filières énergétiques nouvelles peuvent être pilotées par une régulation intelligente (de taxes et d'aides),**
- **la transition énergétique constitue une chance à saisir car elle nous introduit dans le monde économique et social de demain.**

I. LA MULTIPLICITÉ DE L'OFFRE SCIENTIFIQUE ET TECHNOLOGIQUE

Si la question de l'apport des sciences et des technologies avait été posée il y a une trentaine d'années, au moment où le **Club de Rome** annonçait la raréfaction, puis l'épuisement des ressources naturelles, la réponse aurait probablement été teintée de pessimisme.

Plus de trente ans après, le catalogue des propositions scientifiques et technologiques s'est beaucoup enrichi. La science et la technologie offrent aujourd'hui des réponses permettant d'asseoir progressivement la transition énergétique, et de pérenniser un développement durable.

Une approche détaillée de l'ensemble de ces offres technologiques est donnée par **l'excellent rapport de MM. Christian Bataille et Claude Birraux** adopté par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques le 14 mars 2006, « *Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques* ».

Au-delà de cet inventaire très complet, l'objet de la présente étude est de cerner dans quels délais et dans quelles conditions de priorités politiques données aux orientations des recherches et au développement industriel des prototypes, des processus et des filières, ces offres scientifiques et techniques pourront apporter une réponse pertinente pour inverser les tendances de l'économie mondiale actuelle en matière d'émissions de CO₂. Une nouvelle équation économique et sociale commence. Elle doit pouvoir se développer avant que les catastrophes dites naturelles ne fassent reculer la croissance et freinent les investissements nécessaires à toute transition énergétique.

Cela suppose d'analyser plus précisément les données de la transition énergétique, puis d'exposer comment des filières technologiques nouvelles pourraient assurer cette transition.

A. LES DONNÉES DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

1. La consommation mondiale d'énergie primaire

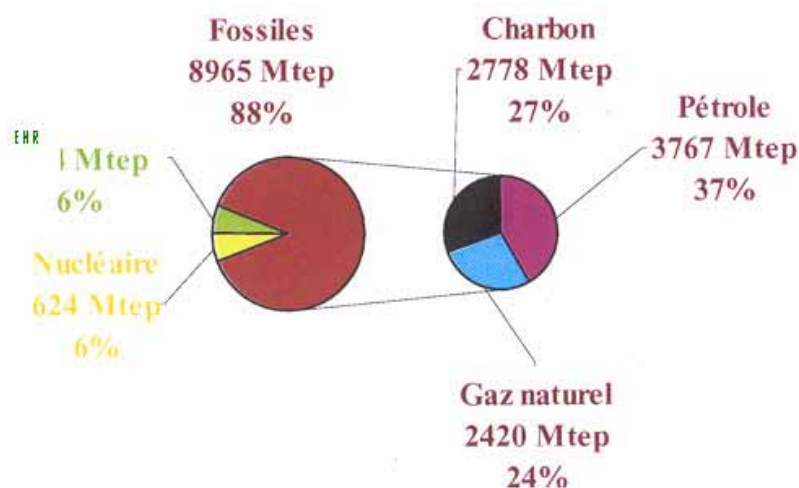
a) La consommation globale

Il convient de rappeler **deux faits simples**.

A l'horizon 2050, la stabilisation des émissions mondiales de CO₂ autour de 550 ppm contre 380 ppm actuellement exige de diviser par deux les émissions constatées en 2000. Compte tenu de la vitesse acquise du système, ce niveau de 550 ppm, déjà difficile à atteindre impliquerait déjà, à l'horizon 2050, une augmentation de la température moyenne de la planète de 1° à 3°C selon les fourchettes d'évaluation du GIEC qui sont plutôt basses.

La tendance actuelle de consommation d'énergie de la planète (environ 10 Gtep, soit 10 milliards de tonnes d'équivalent pétrole) aboutit à une consommation de 15 Gtep en 2020 et à une consommation approchant 20 Gtep en 2030, toujours dans une hypothèse basse sous-estimant ce que l'on constate depuis 2000..

Or, cette consommation d'énergie primaire¹ repose à 88 % sur l'utilisation d'énergies fossiles, donc l'émission de gaz carbonique dans l'atmosphère (sauf captation et stockage) :



Source : BP Statistical Review (2004)

¹ Énergie primaire commerciale, c'est-à-dire abstraction faite des autoconsommations de bois. Si on réincorpore ces utilisations, on aboutit à un pourcentage d'utilisation d'énergie fossile de 85/86 %.

A structure de consommation égale, la poursuite de la tendance aboutirait donc, dès 2030, à un doublement des émissions de CO₂ par rapport à ce qu'étaient ces émissions en 2000, alors que l'objectif est de pouvoir les réduire par deux en 2050.

Ceci démontre l'urgence d'une action énergique pour réduire très fortement la part des énergies fossiles dans les consommations d'énergie et pour éliminer les déchets correspondants de l'atmosphère, donc les capter et les stocker.

b) Les émissions de CO₂ par type d'usage

A l'échelon mondial, l'utilisation de ces énergies fossiles se répartit comme suit par type d'usages :

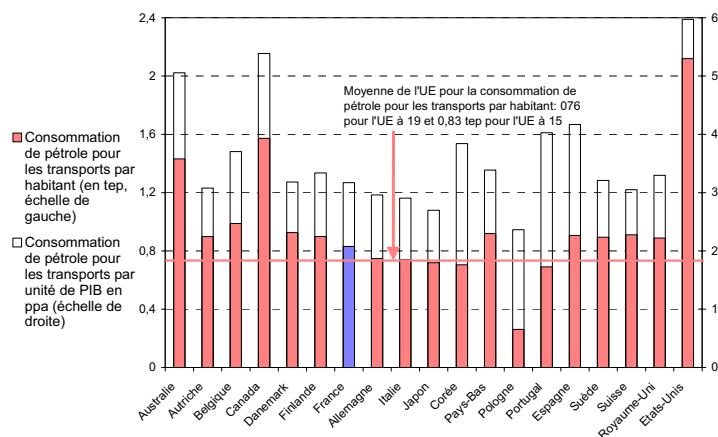
- production d'énergie : 40 %,
 - transports : 24 % (en croissance)
- (soit près des deux tiers pour ces deux seuls usages),
- agriculture-industrie : 19 %,
 - et résidentiel-tertiaire : 17 %.

Naturellement, cette répartition n'est pas uniforme entre les États. Par exemple la Chine, dont une bonne partie de la production d'électricité repose sur des centrales thermiques au charbon aura un taux d'émission de CO₂ dans ce secteur beaucoup plus fort que les pays qui ont recours aux énergies renouvelables ou à l'énergie nucléaire.

De même, en matière de transport, la géographie et les modes de vie ont des incidences marquées.



Des écarts provenant de « circonstances nationales » et de modes de vie différents



Source: Observatoire de l'énergie d'après AIE pour 2003

Ainsi, par unité de PIB, un Américain du nord utilise deux fois et demie plus de pétrole qu'un Japonais ou qu'un Européen.

En creux, cette répartition des émissions de CO₂ par usage des énergies fossiles qui les génèrent, montre qu'il y a **trois secteurs forts d'interventions¹ : la production d'électricité, le résidentiel et les bâtiments ainsi que les transports, sur lesquels l'intervention scientifique et technologique devrait se concentrer.** Ce qui n'exclut pas que le progrès scientifique et technologique puisse s'appliquer aux autres usages de l'énergie primaire.

2. Le cas de la France

Outre qu'il nous concerne directement, le cas de la France est intéressant car il constitue un modèle porteur d'une partie des solutions possibles de transition énergétique mais permet aussi de mesurer les efforts qu'il reste à accomplir.

La part des énergies fossiles utilisées dans la consommation d'énergie primaire ne constitue, en France, que 53 % de ces énergies fossiles (34 % de pétrole, 14 % de gaz naturel et 5 % de charbon sur 266 milliards de tep), contre 87 % aux Etats-Unis.

L'importance de la production d'électricité nucléaire (80 % de l'électricité produite) a pour résultat de ramener à 9 % (au lieu de 40 % à l'échelle mondiale) la part des émissions de CO₂ imputables à la production d'électricité. Notons que cette part était de 90 % en 1973.

Mais dans le même temps, si l'on considère **les consommations finales énergétiques**, la part des énergies fossiles, qui était de 83 % en 1973, est descendue à 71 % en 2003 (46 % de pétrole, 21 % de gaz naturel et 4 % de charbon).

En d'autres termes, si notre pays a très largement surmonté le problème des émissions de gaz à effet de serre liées à la production d'électricité, son bilan en matière d'usages de l'énergie est moins convaincant. Le modèle énergétique français doit donc également faire l'objet d'une réflexion soutenue.

1 L'industrie s'autorégule assez efficacement dans ce domaine. Elle est en outre la première cible du protocole de Kyoto. En témoigne l'AERES, association qui regroupe trente partenaires industriels pour la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Par exemple, l'entreprise RHODIA aura réduit ses émissions de 56 % sur la période 1990-2010, notamment celles de N₂O.

B. LES RÉPONSES DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNOLOGIE

La transition énergétique impose une double exigence : diminuer notre consommation et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Face à ces obligations, la science et la technologie apportent des réponses diversifiées, aussi bien dans la production que dans les usages.

1. Les propositions relatives à la production d'énergie

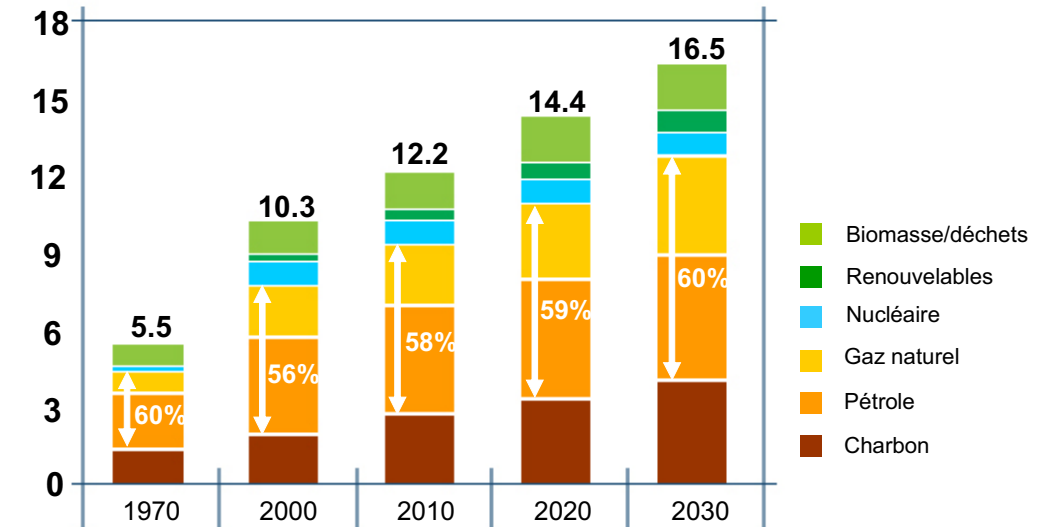
a) Les objectifs

L'équation de base est simple.

La production d'électricité dans le monde repose très largement sur l'utilisation des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Cette **production est responsable de 40 % des émissions annuelles de gaz à effet de serre** ; elle s'adresse, en outre, à l'utilisation des ressources fossiles qui sont – à l'exception du charbon – en voie accélérée de raréfaction et qui donc coûteront de plus en plus cher.

Or, si l'on examine un scénario très optimiste d'évolution de la demande mondiale d'énergie primaire (économies d'énergie, développement des énergies renouvelables, faible croissance de la demande d'ici 2030) on observe que **même dans cette hypothèse vertueuse, la part de la demande potentielle en énergie fossile est en accroissement par rapport à 2000** (60 % pour le pétrole et le gaz naturel contre 56 % en 2000, et en légère hausse pour le charbon) :

Evolution de la demande mondiale d'énergie primaire

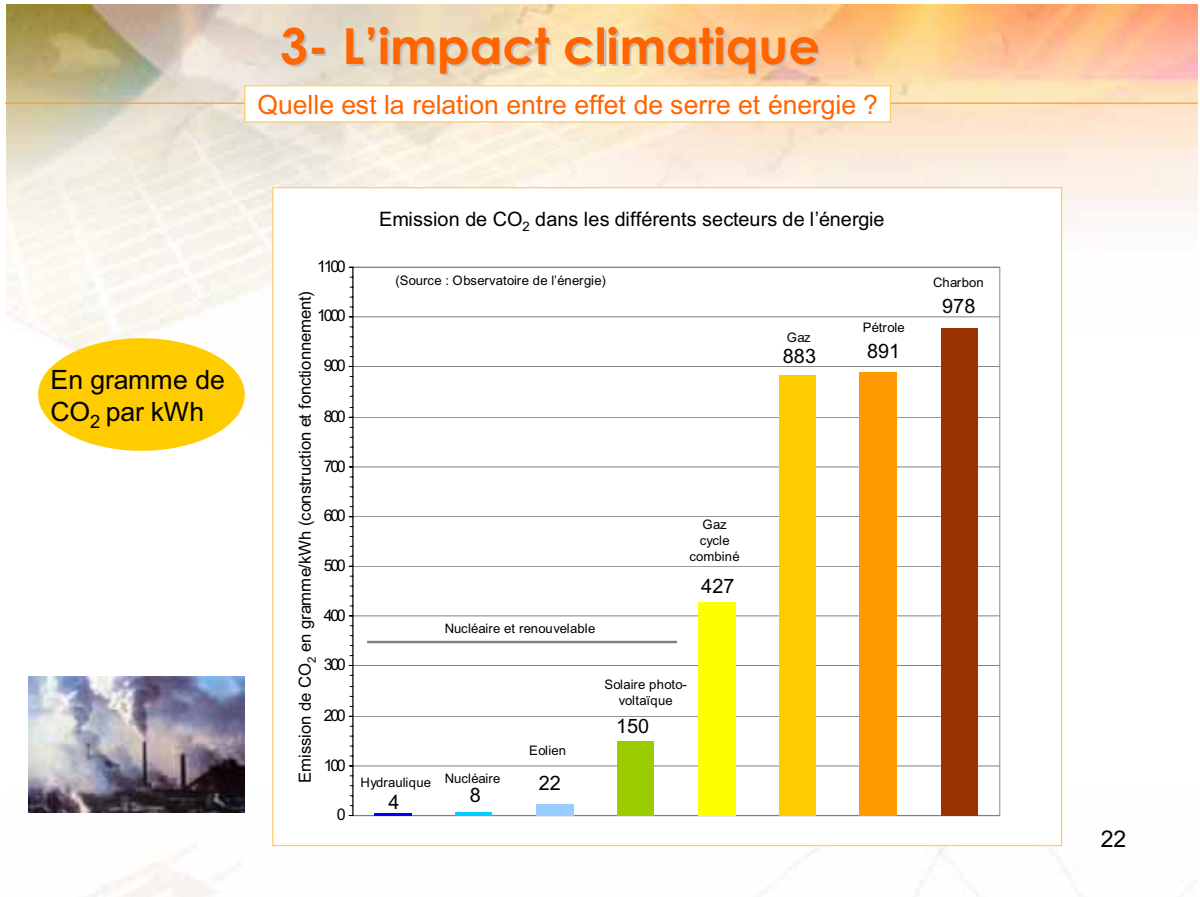


Scénario alternatif : progression de 45% de la demande mondiale d'énergie primaire d'ici 2030 (économies d'énergie, utilisation de technologies propres...)

Source : AIE WEO 2004

Par rapport à cette évolution (qui pêche par son excès d'optimisme, au regard de la croissance continue des besoins de l'économie mondiale), **il n'y a qu'une seule solution ; diminuer d'urgence par tous les moyens le recours aux énergies fossiles.**

Or, si l'on examine l'impact de chacune des sources d'énergie sur les émissions de gaz à effet de serre :



Source : CEA LETI

l'on s'aperçoit :

- que celle de cette **énergie fossile qui est la plus abondante**, le charbon, est **celle qui émet le plus de CO₂¹**,
- et que pour le reste il n'y a que **deux types de sources énergétiques qui ont un niveau satisfaisant d'émissions**, **l'énergie nucléaire et les différentes énergies renouvelables**.

¹ Relevons également une donnée qui ne figure pas dans ce tableau : une étude britannique vient de montrer que l'incinération des déchets pour produire de la chaleur et de l'électricité émet 600 g de CO₂ par KW/h, soit 40 % de moins que le charbon, mais toutefois plus que l'éolien et 70 fois plus que le nucléaire.

Dans ces conditions, l'apport de la science et de la technologie dans la production d'électricité, et principalement d'électricité, est bien cerné ; il s'agit :

- de diminuer fortement ou de supprimer les émissions de CO₂ dans les centrales thermiques,
- et de renforcer l'efficacité des deux filières de substitution que représentent le nucléaire et les énergies renouvelables.

Mais il faut bien comprendre que les 4 Gtep (40 % des 10 Gtep de consommation mondiale d'énergie) d'énergies fossiles consacrés à la production d'énergie ne pourront trouver de substituts que progressivement. **Il ne peut donc pas y avoir en 2030 une solution unique mais seulement des « mix énergétiques » nouveaux incluant plusieurs éléments.**

Par exemple, le développement d'une énergie nucléaire plus efficace et gérant mieux l'aval de son cycle est une des voies prioritaires pour limiter les émissions de gaz à effet de serre, mais ne constitue qu'un des éléments de la solution.

Actuellement, avec 437 réacteurs en service dans 32 pays au monde, le nucléaire représente 6 % à 7 % de l'énergie primaire consommée dans le monde et 17 % de l'énergie électrique produite. **Les scénarios de poursuite du développement du nucléaire fournis par l'Agence de l'énergie nucléaire de l'OCDE montrent qu'il sera difficile de porter le nombre de réacteurs à plus de 720 en 2030 et à plus de 1120 en 2050.** Ce qui aboutirait, en 2030, à porter la capacité du nucléaire à produire un peu moins du tiers de l'électricité mondiale. L'installation des réacteurs de génération IV plus puissants aidant pourrait porter cette capacité entre 45 et 50 % autour de 2050, ce dernier pourcentage variant en fonction de l'état de modernisation du parc.

b) La rénovation des filières émettrices de gaz à effet de serre

(1) La cogénération par cycle combiné à gaz

Ces technologies, qui reposent sur les progrès effectués dans le cycle de cogénération (électricité + chaleur) des turbines à gaz naturel sont matures et déjà largement utilisées.

Elles utilisent un combustible dont la raréfaction sera décalée de 2 ou 3 décennies par rapport à celle du pétrole et émettent deux fois moins de gaz à effet de serre que les centrales thermiques utilisant le pétrole ou le charbon.

Elles répondent, comme les centrales classiques, aux contraintes de souplesse d'utilisation pour répondre aux pics de demande.

Enfin, elles peuvent utiliser des gaz issus des déchets ménagers, agricoles, hospitaliers, industriels ainsi que le bois.

Pour ces raisons, la substitution de ce type de technologies aux technologies thermiques classiques par la production d'électricité doit constituer une **première solution d'attente** pour les vingt prochaines années.

Il ne peut s'agir cependant que d'une **solution provisoire puisque, en l'état, leur bilan total (construction/fonctionnement) d'émission de gaz à effet de serre est trois fois plus important que le photovoltaïque, vingt fois plus important que l'éolien et cinquante fois plus important que le nucléaire, sauf si la capture du CO₂ et son stockage sont pratiqués.**

(2) La rénovation de la filière charbon

(a) L'amélioration des centrales classiques

Le charbon assure une part importante de la production électrique dans le monde.

Comme l'avaient relevé nos collègues Christian Bataille et Claude Birraux dans leur rapport sur « *Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques* », il assure 40 % de la production électrique mondiale, mais 50 % aux Etats-Unis et 80 % en Chine.

Par ailleurs, il constitue la seule énergie fossile encore abondante puisque les réserves excèdent deux siècles, et sont d'accès relativement aisé.

La rénovation de la filière charbon, dédiée à la production électrique, est donc un enjeu important.

On mentionnera en premier lieu les progrès technologiques effectués dans le domaine des centrales à lits fluidisés qui optimisent le cycle thermique du charbon. De même, les centrales dites à vapeur super critiques, technologie déjà disponible mais qui est en voie d'amélioration mettent en œuvre des températures et des pressions de plus en plus élevées, ce qui permet de porter les rendements de 30 % pour une centrale classique à 40-45 % et quelquefois au-delà, ce qui réduit au moins du tiers les émissions de CO₂.

A côté de ces technologies d'amélioration des processus classiques se développent – actuellement sous la forme de prototypes – des centrales dites « à gazéification intégrée et à cycle combiné », dans lesquelles le charbon est utilisé pour produire du gaz de synthèse utilisé par une turbine à gaz qui produit de la vapeur d'eau alimentant une turbine à vapeur pour produire de l'électricité. Ce processus diminue les émissions de gaz à effet de serre.

Il s'agit d'un cycle complexe exigeant plusieurs transformations et donc des pertes de rendements intrinsèques au processus et qui demande à être plus maîtrisé technologiquement. Mais le principal obstacle au développement de cette technologie réside dans les coûts d'investissement.

En toute hypothèse, l'ensemble de ces progrès technologiques a abouti ou aboutira à réduire les émissions de CO₂ dans des proportions

non négligeables, mais pas à les supprimer, sauf capture, stockage et séquestration.

(b) La captation-séquestration du CO₂

Les technologies de captation-séquestration pourraient être un élément central de l'évolution du modèle énergétique mondial en matière de suppression des émissions de CO₂ liées à la production d'électricité.

Comme le note le rapport précité de MM. Birraux et Bataille :

« La capture du CO₂ issu de l'utilisation de combustibles fossiles est réalisée dans la pratique selon trois grands types de technologies.

« La capture postcombustion correspond à la récupération du CO₂ dans les fumées issues de la combustion.

« La capture précombustion correspond à la décarbonatation du combustible en préalable à la combustion. Le dioxyde de carbone est alors récupéré en amont de la combustion. Celle-ci ne porte alors que sur l'hydrogène et ne délivre que de la vapeur d'eau.

« La capture par oxycombustion correspond au remplacement du comburant habituel – l'oxygène de l'air – par de l'oxygène pur, ce qui permet d'obtenir en aval un flux de dioxyde de carbone très concentré ou pur¹. »

Capté, le dioxyde de carbone doit également **être transporté**, s'il n'est pas possible de le séquestrer sur les lieux de captation. Des transports de ce type, à usages industriels existent, notamment aux Etats-Unis.

Les techniques de séquestration sont multiples :

- le stockage sous forme de minéralisation, source d'une consommation d'énergie importante est d'un coût élevé, de l'ordre de 120 € la tonne de CO₂ ;
- le stockage océanique qui présente des risques importants de libération ultérieure de CO₂ et dont le coût serait de l'ordre de 6 à 36 € la tonne ;

¹ Une expérimentation d'oxycombustion est en projet à Lacq (par Total).

- le stockage en couches géologiques profondes, soit dans les :
 - gisements pétroliers ou gaziers qui font l'objet d'expériences ;
 - aquifères salins profonds, qui permettraient de piéger le CO₂ avec un degré de stabilité élevé et qui présentent le double avantage d'offrir une capacité mondiale de stockage presque illimitée (400 à 10 000 milliards de tonnes de CO₂)¹ et de pouvoir s'effectuer à des coûts estimés relativement faibles (entre 0,5 et 10 € la tonne), selon les évaluations.

La mise en œuvre de l'ensemble de ces technologies de captation-séquestration du CO₂ pourrait représenter une part de la solution : elles permettraient d'utiliser les réserves mondiales de charbon tout en éliminant les émissions de gaz à effet de serre liées à l'utilisation de ces réserves.

Mais leur introduction se heurte à deux types d'obstacles :

- **technologiques**

- les technologies de captation sont connues mais doivent être perfectionnées, notamment en ce qui concerne les baisses de rendement quelquefois importantes qu'elles impliquent ;
- les technologies de séquestration doivent faire l'objet de plus d'expérimentation tant ce qui concerne la stabilité du CO₂ séquestré que l'acceptation sociale du procédé ;

- **économiques**, car il s'agit de mettre en place, à des coûts compétitifs, une filière qui intéresserait plus de 2 000 centrales thermiques à charbon dans le monde. Or, les coûts d'investissement pour la seule captation se chiffrent à chaque fois à plusieurs centaines de millions d'euros (*cf. infra* II – Les problèmes liés à l'introduction des filières de substitution).

c) Les filières électronucléaires

L'énergie nucléaire est un des pivots de la transition énergétique. Dans son cycle construction/fonctionnement **elle fabrique de l'électricité en émettant 100 fois moins de gaz à effet de serre que le charbon ou le pétrole.**

C'est une source d'énergie dont les réserves sont relativement abondantes et la sécurité d'approvisionnement *a priori* mieux assurée que celle du pétrole.

¹ Les émissions planétaires de CO₂ sont évaluées à 23 milliards de tonnes.

Elle peut en outre, à terme, être le support d'une cogénération d'électricité et d'hydrogène à très haute température.

Ceci explique que des pays qui avaient renoncé à la filière électronucléaire ou prononcé un moratoire sur la construction de nouveaux réacteurs réexaminent ou sont revenus sur leur position.

Si l'on ne peut que mentionner les perspectives offertes par l'énergie nucléaire de fusion – dont on estime qu'elles ne déboucheront pas, au moins, avant la fin de ce siècle – les propositions scientifiques et technologiques visent à résoudre deux problèmes :

- celui de la valorisation de l'uranium 238 utilisé comme combustible – la filière en place n'en valorisant qu'1 %,
- et celui de la gestion des déchets.

Les réacteurs de la génération III, qui seront en place vers 2020 (comme l'EPR en France), permettront d'utiliser plus largement du plutonium sous forme de MOx. La génération IV, dont l'implantation est prévue à partir de 2035-2040, fait l'objet de recherches coopératives entre les principales firmes et États mondiaux.

Six concepts ont été retenus à ce titre par 10 pays, dont ceux des réacteurs à neutrons rapides qui pourront consommer par fission les principaux actinides. Cela multiplierait d'un facteur 5 à 80 la matière fossile disponible et donc assurerait des réserves de combustibles fossiles pour des millions d'années. Il résoudrait en grande partie le problème de l'accumulation des déchets par recyclage des combustibles.

D'autres voies seront également explorées, comme les réacteurs sous-critiques pilotés par accélérateurs, avec des réacteurs à sels fondus utilisant le thorium comme combustible.

Cinq des pays du Forum International Generation IV (Canada, États-Unis, France, Japon et Royaume-Uni) viennent de signer un accord, au mois de mars 2005, afin de travailler sur les problèmes techniques que posent ces réacteurs.

Six réacteurs seront étudiés. Quatre de ces réacteurs fonctionneront avec des neutrons rapides, afin de recycler le combustible utilisé. D'autres atteindront des températures élevées (près de 1 000°C) afin de produire de l'hydrogène. Les fluides caloporteurs choisis sont variés : sodium, gaz, ou eau.

S'agissant de la modernisation de cette filière nucléaire, nous pensons utile d'accélérer la mise en œuvre des réacteurs de génération IV.

Ceci implique que les moyens mis à l'appui de l'effort de recherche devraient être doublés (en France notamment).

La mise en place de protocoles internationaux relayant et étendant celui de Kyoto valoriserait fortement une filière particulièrement économe en émissions de gaz à effet de serre et concourrait à l'extension plus rapide du parc.

d) Les énergies renouvelables

(1) Caractéristiques des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables constituent près de 10 % de la part énergétique mondiale. 9 % de ces 10 % concernent des énergies renouvelables facilement stockables comme l'hydraulique (3 %) et la biomasse (6 %).

La part des autres énergies « nouvelles » est très marginale dans le modèle énergétique mondial : éolien 0,04 %, solaire 0,01 %.

On a vu que dans le domaine de la production d'énergie la transition énergétique commande que l'on fasse appel à toutes les sources d'énergie disponibles n'impliquant pas des carburants fossiles émettant des gaz à effet de serre.

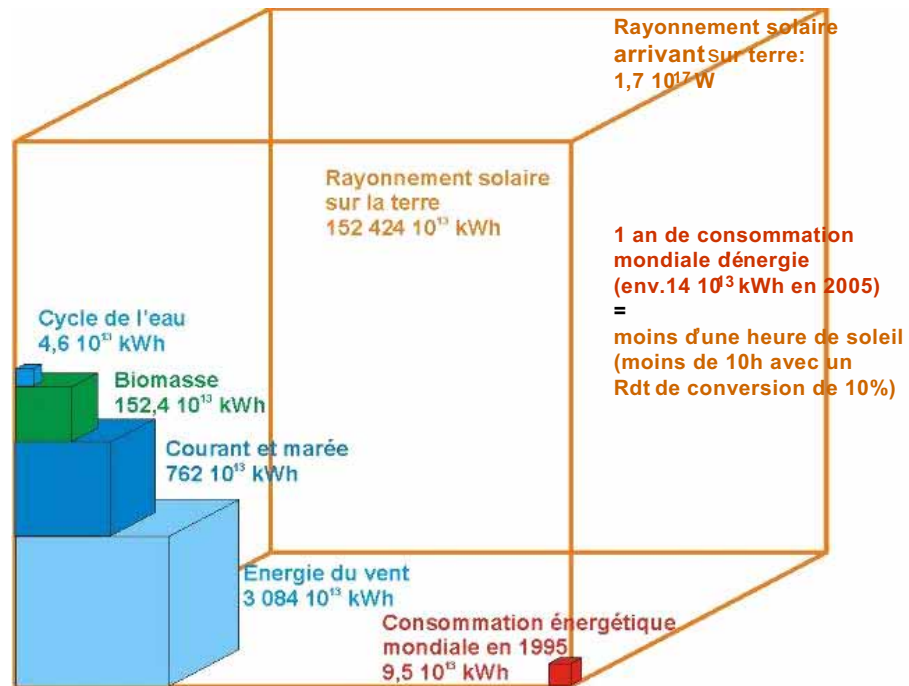
Il va donc de soi que toutes les formes d'énergies renouvelables sont appelées à être des composantes du modèle énergétique futur.

Mais les caractéristiques, positives ou négatives, de ces énergies font qu'au-delà de ce constat de bon sens, on doit examiner les avancées scientifiques et technologiques susceptibles d'accélérer leur déploiement.

(a) Les caractéristiques positives

Les énergies renouvelables présentent l'avantage d'être abondantes et présentes partout dans le monde

De plus, les énergies renouvelables sont potentiellement presque illimitées par rapport à nos besoins :



POTENTIEL MONDIAL DES ENERGIES RENOUVELABLES

Ainsi, le rayonnement solaire annuel représente 5 000 fois la consommation mondiale d'énergie, l'énergie du vent 300 fois, les courants et marées 80 fois et la biomasse 15 fois.

(b) Les caractéristiques négatives

Mais certaines de ces énergies renouvelables ne sont pas faciles d'accès, c'est le cas des courants océaniques et de la géothermie, et surtout elles sont :

• **diffuses**, et fournissent donc des puissances faiblement réparties. Par exemple, pour produire 1 GW pendant une année, il faut :

- 2,6 MT de charbon ou 1,8 MT de pétrole réparties entre 5 centrales thermiques,
- ou un réacteur nucléaire, ou encore :
- **12 barrages de type Serre-Ponçon,**
- **1 500 éoliennes de 2 MW, réparties sur 150 km,**

- **18 usines marémotrices** identiques à celle de la Rance,
- ou de **70 à 100 km² de panneaux solaires**,
- et **intermittentes**¹ en fonction de la pluviométrie, de l'alternance du jour et de la nuit ou du régime des vents. Ce qui a pour conséquence qu'elles ne peuvent pas assurer à coup sûr une réponse aux pics de consommation d'électricité.

Au regard des besoins de sociétés très urbanisées qui se sont constituées sur des schémas centralisés de distribution d'électricité, la contribution des énergies renouvelables (à l'exception de l'hydroélectricité) peut paraître manquer de pertinence.

D'où la **tentation de reléguer le développement de ces énergies à des zones isolées des grands systèmes d'urbanisation ou de distribution d'électricité**. On peut penser au tiers de l'humanité qui vit à l'écart des grands réseaux de distribution et qui est alimenté en électricité par des réseaux utilisant des groupes électrogènes.

Cette façon de considérer le problème n'est pas justifiée :

- en toute hypothèse, pour diminuer les 40 % d'émissions de CO₂ qui sont imputables à la production d'électricité, **il faudra faire appel à des sources d'énergie complémentaires qui émettent peu, ou moins, de gaz à effet de serre**,

- par ailleurs, l'idée qu'il faut reléguer les énergies renouvelables à des emplois mineurs dans le futur modèle énergétique mondial comporte plusieurs conséquences peu souhaitables.

En premier lieu, cela peut conduire à défavoriser une filière dans les arbitrages rendus sur l'attribution des crédits de recherche. Or l'augmentation de ces crédits est nécessaire.

En second lieu, les progrès du stockage de l'électricité par batteries ou condensateurs permettront de pallier certains inconvénients liés à l'intermittence. Enfin, la transition énergétique devra établir peu à peu des liens entre des réseaux centralisés de distribution d'électricité et des réseaux décentralisés ou productions isolées.

Les énergies renouvelables sont donc appelées à être une composante importante du « panier » énergétique futur. Et ce d'autant plus que l'apport des sciences et technologies est en passe d'activer notablement les coûts et les rendements de certaines de ces filières.

¹ A l'exception de la géothermie.

(2) La géothermie

La géothermie, haute et moyenne énergie, est assez largement diffusée ; elle contribue pour 8 GW à la production d'électricité dans le monde. Son extension achoppe à deux difficultés :

- d'une part, la géothermie, haute et moyenne énergie volcanique, suppose l'implantation de forages pour capter des gisements de vapeur entre plusieurs centaines de mètres (de 90°C à 180°C) et plus d'un kilomètre (de 250°C à 350°C). Or si le bilan énergétique de ce pompage est favorable, **les coûts – entre la moitié et les deux tiers de la charge financière - sont assez souvent prohibitifs,**

- d'autre part, dans certains cas la composition de la vapeur pompée peut créer des problèmes de corrosion non maîtrisés.

(3) L'éolien

L'éolien est **un bon cas d'école des avantages et des inconvénients des énergies renouvelables.**

Assez économe en émissions de gaz à effet de serre (elle émet 45 fois moins de CO₂ que le charbon par KW/h produit), cette énergie se caractérise aussi par l'intermittence et la faiblesse de puissance.

Les éoliennes ne fonctionnent qu'à des forces de vent entre 18 km/h et 90 km/h. En cas de temps très froid ou de canicule, périodes dans lesquelles se situent des pointes de consommation, leur réponse est très faible en raison de la présence d'anticyclones. Par exemple, en France, les sites les plus propices au développement de l'éolien n'offrent que 2 000 heures de fonctionnement nominal.

Leur faible puissance est aussi un obstacle.

A titre d'illustration, **l'Allemagne qui possède le tiers de la puissance éolienne mondiale installée (16 GW sur 46 GW) n'en tire que 4 % de sa production d'électricité.**

En outre, leur caractère irrégulier pose aux réseaux de transport des problèmes complexes au point que le plus grand producteur allemand d'électricité a pu dire publiquement que pour lui les éoliennes étaient un problème lorsqu'il y avait du vent.

La progression technologique dans ce domaine relève principalement du gigantisme car plus la turbine est placée en hauteur, plus elle reçoit des vents puissants, le rendement du système variant en fonction du cube de la vitesse du vent.

En prototypage sont étudiées des éoliennes de 3,5 MW de puissance d'une hauteur de 100 mètres avec des pales couvrant un diamètre du même ordre.

L'implantation de fermes d'éoliennes en mer est une réponse plus politique qu'économique. Cette technologie bénéficie d'une plus grande tolérance sociale, mais pour des rendements de 60 % supérieurs aux fermes terrestres, leurs coûts d'implantation et d'entretien sont multipliés par deux.

Mais quelles que soient les difficultés économiques et sociales de déploiement de cette source d'énergie renouvelable, **elle constitue un apport non négligeable à la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre.**

(4) L'hydraulien

Le développement de turbines sous-marines reposant sur les fonds ou sur des mâts et actionnées par les courants pose des problèmes complexes.

Les sites d'implantation situés à proximité des côtes sont assez rares car ils exigent au minimum des courants de 4 nœuds. En outre, cette technologie se heurte à des problèmes liés aux agressions des milieux marins (corrosion, action des algues, et des micro-organismes).

Cependant un pays comme la France a des potentiels intéressants (Bretagne, Cotentin). Et il dispose d'un savoir-faire technologique lié à l'usine marémotrice de la Rance.

(5) L'énergie solaire

(a) L'énergie solaire thermodynamique

Cette technologie consiste à mettre en œuvre des centrales thermiques concentrant le rayonnement solaire en vue de produire de l'électricité à des puissances de production de quelques dizaines de KW à plusieurs centaines de MW.

Le solaire thermodynamique, après avoir été abandonné dans les années quatre-vingt, fait à nouveau l'objet de développement – en particulier dans les pays qui bénéficient à la fois **d'un ensoleillement fort et d'une densité de population restreinte.**

Car l'extension du solaire thermodynamique – tout au moins pour la production massive d'électricité – peut créer des problèmes d'acceptation sociale : l'emprise au sol d'une centrale d'1 GW est de l'ordre de 70 à 100 km².

(b) L'énergie solaire photovoltaïque

Il y a actuellement **un hiatus entre la perception culturelle du solaire photovoltaïque** – largement centrée sur l'idée qu'il doit être dédié à des sites isolés – et **la réalité de son développement qui concerne pour les deux tiers des installations mises en réseau dans des pays très développés.**

Le photovoltaïque est en pleine expansion. La production mondiale a atteint 1 GW en 2004 (avec des investissements de l'ordre d'un milliard d'euros par an) et est 20 fois supérieure à ce qu'elle était il y a 15 ans.

Les prévisions d'extension de la filière sont assez impressionnantes :

- le Japon, qui est avec l'Allemagne le plus avancé dans ce domaine, a un plan qui prévoit d'avoir installé 4,8 GW en 2010 et 100 GW en 2030,
- l'Union européenne, de façon plus proclamative, escompte sur l'installation de 3 GW en 2010 et 41 GW en 2020 (en 2005, 26 MW sont déployés en France et 794 MW en Allemagne).

Mais il faut relever que le déploiement du photovoltaïque en réseau dans les pays très développés repose sur des bases économiques encore artificielles : l'obligation pour les opérateurs de racheter le courant ainsi produit à des tarifs nettement plus élevés que le prix moyen de production locale de l'électricité.

Actuellement la filière silicium (mono et polycristallin principalement) fournit 95 % de la demande.

Le silicium monocristallin est plus coûteux mais fournit des rendements de conversion de l'ordre de 25 % en laboratoire et de 18-20 % en développement industriel. Le silicium polycristallin, moins coûteux, n'aboutit qu'à des rendements de 13 %. On développe également des plaques dites « couche mince » (de l'ordre de 10 à 50 μ contre 500 μ) permettant d'utiliser des matériaux moins purs, donc moins chers, mais qui n'offrent en l'état que des rendements inférieurs à 10 %.

Des développements sur les polymères doivent être mentionnés mais ces dispositifs n'ont que des rendements de 3 à 5 % et une durée de vie de l'ordre d'un an (contre une vingtaine d'années pour les dispositifs silicium et dix ans pour l'électronique de ces dispositifs), ce qui les cantonne à des usages forains¹.

Les éléments qui précèdent montrent que beaucoup des pays les plus avancés scientifiquement estiment que la filière photovoltaïque est une filière complémentaire de production d'électricité d'avenir.

En matière d'économies de rejets de gaz à effet de serre, elle est relativement coûteuse² (sept fois plus que l'éolien), mais elle demeure

¹ Par exemple, les troupes américaines en Irak sont dotées d'installations photovoltaïques permettant de faire fonctionner un ordinateur ou de recharger des téléphones portables à partir d'un dispositif comportant des plaques minces de capteurs photovoltaïques.

² Cela s'explique par les techniques de formatage du silicium, qui s'effectue dans des fours à très haute température.

intéressante par rapport aux centrales thermiques au charbon et au pétrole (quinze fois moins de rejets).

Son bilan énergétique est équilibré après 3 années de fonctionnement.

L'intérêt des grandes nations scientifiques pour le développement du photovoltaïque repose assez largement sur les possibilités de percées technologiques dans la filière dont les coûts ont déjà été divisés par cinq en vingt ans.

La plupart des personnes entendues sur ce problème estiment :

- que **d'ici dix-quinze ans on aura divisé par 3 le coût total du courant produit**, ce qui le rapprochera des coûts du courant utilisé en période de pointe de consommation,

- qu'à un horizon de vingt ans les progrès des nanotechnologies permettront encore de diviser par deux ou par trois ces coûts. **En utilisant mieux les structures du silicium à l'échelle nanométrique, on pourrait porter les rendements de conversion de la filière jusqu'à 50 %.**

A terme, le photovoltaïque offre donc une véritable perspective technique et économique.

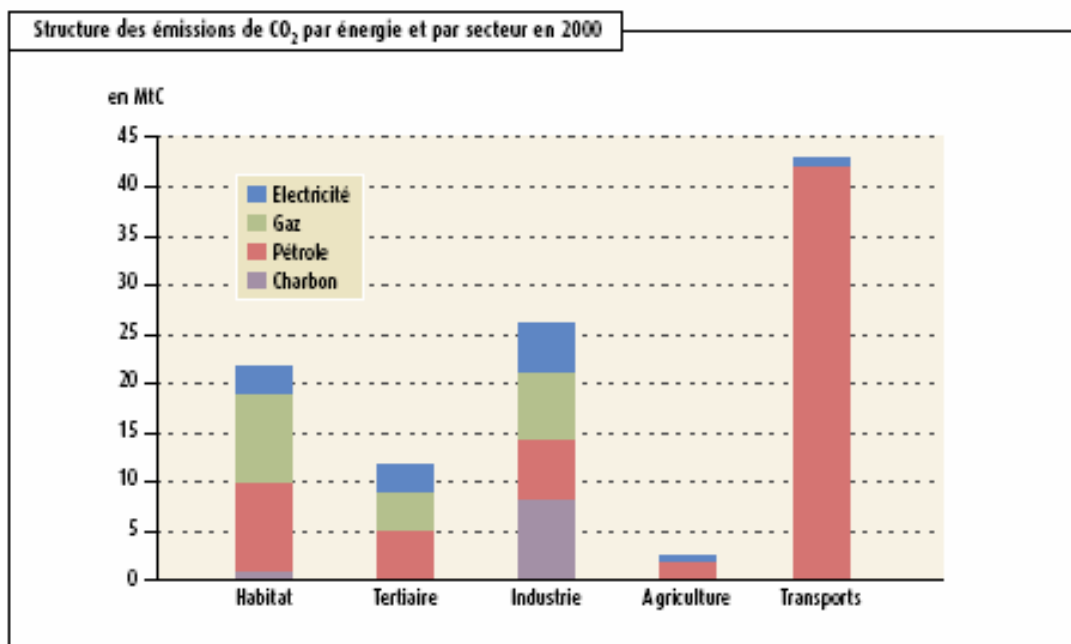
2. Les propositions concernant les usages de l'énergie

a) Les données stratégiques

A l'échelle planétaire, la production d'électricité est responsable de 40 % des émissions de gaz à effet de serre du fait de la prévalence de l'emploi de combustibles fossiles à fort taux d'émission comme le charbon ou le pétrole.

C'est dire que 60 % de ces émissions de CO₂ résultent des usages directs des combustibles fossiles.

Si on s'intéresse au cas de la France tel qu'il est décrit dans le rapport de la Mission interministérielle de l'effet de serre (MIES), « *La division par 4 des émissions de dioxyde de carbone d'ici 2050* », la structure des émissions de CO₂ est la suivante :



Dans un pays où les modes de production de l'électricité sont « vertueux » puisqu'ils impliquent relativement peu d'émissions de CO₂, la part de ces émissions se répartit comme suit :

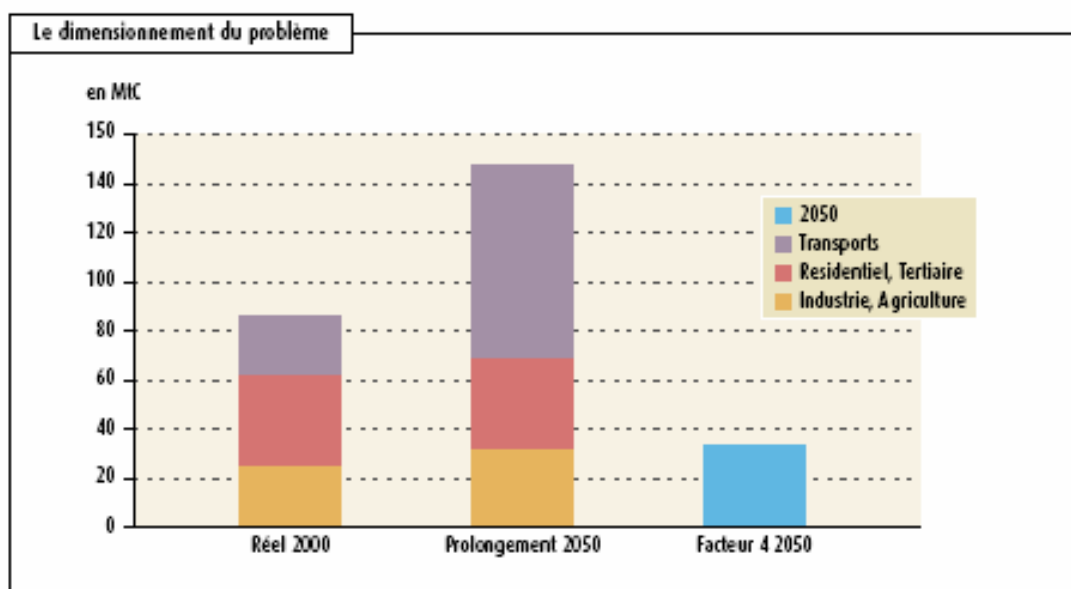
(1) par énergie finale :

- l'emploi du pétrole représente 62 % des émissions,
- celui du charbon 8,5 %,
- et celui du gaz naturel 19 %.

(2) par secteurs de consommation :

- le transport représente 41 % des émissions,
- le bloc « résidentiel-tertiaire » 33 % des émissions,
- l'industrie 24 %, dont 5 % pour la sidérurgie,
- et l'agriculture 2 %.

La poursuite de la tendance actuelle, comparée à l'objectif de division par quatre des émissions de gaz à effet de serre **aboutirait à multiplier par 1,8 les émissions en 2050** :



Au total, le secteur résidentiel tertiaire consomme aujourd'hui autant ce qu'il serait possible d'émettre en 2050 dans l'hypothèse d'une réussite de l'objectif « facteur 4 » et, surtout, le secteur des transports consomme 1,3 fois plus et croît de 2 % par an, ce qui fait plus qu'annuler les progrès enregistrés sur les autres usages de l'énergie.

Dans la mesure où les émissions dues à l'agriculture sont marginales et où celles imputables à l'industrie se réduisent progressivement du fait de la concurrence et de l'introduction d'un marché des émissions de CO₂ à laquelle le secteur est soumis, les données qui précèdent tracent une perspective claire.

La réussite de la transition énergétique est donc étroitement liée à une forte diminution de l'usage des combustibles fossiles dans les secteurs du résidentiel tertiaire et des transports.

b) Le résidentiel tertiaire

(1) L'évolution générale des consommations

Les perspectives de la transition énergétique dans le secteur du « résidentiel-tertiaire » doivent prendre en compte des données d'évolution contradictoires.

En premier lieu, c'est un des secteurs dont les usages génèrent le plus d'émissions de gaz à effet de serre. La réduction de ces émissions doit donc être une priorité.

Par ailleurs, c'est un secteur où les progrès accomplis en matière d'économies d'énergie ont été très importants depuis trente ans. **Du fait des réglementations thermiques et à confort équivalent, la consommation par m² d'un logement neuf a diminué de 60 % depuis 1973.**

Mais :

- **L'état du parc est très hétérogène** puisqu'il se renouvelle à un rythme très lent : 1 % pour le résidentiel, près de 2 % pour le tertiaire. L'évolution du stock de logements fait que 65 % d'entre eux ont été construits avant 1975, c'est-à-dire avant la mise en place des réglementations thermiques. Si on extrapole l'état du parc en 2050, 28 millions de logements auront été construits avant 2000, et 15 millions après 2000. **Ce qui, en creux, montre l'importance à accorder aux actions de rénovation.**

- La **surface du parc** s'accroît :

- le tertiaire qui occupe 80 % de la population active sur 700 millions de m² nécessite de plus en plus de surface,
- la décohabitation des couples et l'accroissement de la taille des logements ont le même effet dans le secteur résidentiel : la surface des logements aura crû de 20 m² par personne en 1960 à 35 m² en 2050. De même, lorsqu'en 1973 trois personnes occupaient un logement, on n'y trouvait plus que 2,5 personnes en 2000 et les prévisions pour 2050 tablent sur 2 personnes par logement.

- **Des besoins nouveaux spécifiques, comme la climatisation, apparaissent.**

- **Les consommations d'électricité dites spécifiques augmentent fortement.** Dans le tertiaire, ces consommations sont passées de 60 KWh/m² en 1973 à 110 KWh/m² en 2000. Dans le résidentiel, la croissance du taux d'équipement des ménages en électroménager a été récemment relayée par l'essor des produits dits « bruns ».

Si on extrapole la poursuite de cette tendance, **on estime qu'en 2050 cette consommation sera multipliée par 2,3.** Pour donner un ordre de grandeur, cela signifie, pour les immeubles d'activité tertiaire, que l'essentiel des économies accomplies depuis 1973 grâce à la réglementation thermique seront absorbées par cette croissance.

Ces données générales montrent, tant du fait de l'importance des stocks à rénover que de la montée des besoins normaux, **que la transition énergétique dans ce domaine n'est pas acquise. Ceci tant en ce qui concerne les usages thermiques et frigorifiques que les usages électriques.**

(2) Les usages thermiques et frigorifiques

Cet intitulé regroupe trois types d'usages : le chauffage, l'eau chaude et la climatisation, les deux premiers de ces usages étant clairement plus producteurs d'émissions de gaz à effet de serre (du fait de l'importance des fluides fossiles – fuel et gaz – employés) que le dernier. Ces deux premiers usages représentent plus de 95 % de l'énergie consommée.

Une première tentation consiste à privilégier un passage massif à l'électricité produite en majeure partie sans émission de gaz à effet de serre.

Cela aurait pour conséquence de multiplier par quatre la production d'électricité en 2050, et de créer des pics de consommation très forts qui, en l'état des technologies, ne peuvent être assurés que par des centrales fonctionnant à l'aide de combustibles fossiles. Par conséquent, sans qu'un accroissement du recours à l'électricité pour ces usages – accroissement qui sera probablement activé par la montée du prix du fuel domestique ou du gaz naturel – ne puisse être écarté, l'amplification de ce recours ne pourra pas être la seule voie pour assurer la transition énergétique dans ce domaine.

Il faudra donc revenir à **d'autres solutions technologiques.**

Celles-ci sont diverses, mais doivent prendre en compte deux faits : l'exigence prioritaire de rénovation du stock de bâtiments et des installations de chauffage et l'inertie d'introduction des nouvelles technologies dans le secteur – qui est de l'ordre d'une décennie.

Concernant le chauffage des bâtiments et la production d'eau chaude destinée au résidentiel individuel, les principales pistes sont les suivantes :

- Les techniques actuelles d'isolation – applicables au stock existant offrent des marges d'économie de chauffage considérables, de l'ordre de 30 %. Leur activation par des mesures incitatives (fiscales ou de crédit) est un enjeu de premier plan¹.

- Le recours aux énergies renouvelables offre également des solutions facilement applicables sous réserve des mêmes incitations :

¹ Les Français font, dans leur habitation individuelle, 3 000 € de travaux par an.

- utilisation de la biomasse (bois) pour le chauffage qui s'effectue à bilan d'émission de gaz à effet de serre nul¹,
 - recours massif au solaire thermique pour la production d'eau chaude,
 - recours au solaire photovoltaïque pour la production d'électricité aux mêmes fins,
 - développement des techniques dites « de plancher solaire » (captation de la chaleur sur les toits diffusée par les planchers),
 - pompes à chaleur de profondeur ou de surface.
- Les techniques d'architecture bioclimatique (épaisseur des murs, augmentation des surfaces vitrées au sud, etc.).
- Les technologies d'isolation portant par exemple sur la création de panneaux d'isolation sous vide qui peuvent diminuer par 10 les pertes caloriques des bâtiments, ou les matériaux à changement de phase qui renforcent l'isolation du bâtiment contre les effets du froid ou de la chaleur. Certaines de ces technologies appliquées au résidentiel individuel aboutissent à des consommations de l'ordre de 30 à 40 KWh/m², voire moins (contre 100 KWh/m² pour la réglementation thermique actuelle). Des prototypes de maisons à bilan énergétique nul sont également construits.

Les technologies applicables aux immeubles collectifs posent un problème différent : la rénovation de ces immeubles est beaucoup plus difficile à mener aussi bien en matière d'isolation que de systèmes de production de chauffage ou d'eau chaude.

En revanche, comme leur taux de renouvellement – tout au moins dans le tertiaire – est double de celui du résidentiel, **des politiques appropriées d'incitation pourraient permettre de leur appliquer rapidement des innovations technologiques à fort contenu d'économies d'énergie.**

Outre les technologies reposant sur les nouveaux matériaux déjà mentionnées, plusieurs axes de recherche doivent être mentionnés :

- les recherches sur les installations de cogénération de faible ampleur,

¹ Le bois brûlé émet du CO₂ mais qui a été antérieurement capté par la photosynthèse. On peut juste estimer sur ce plan qu'il y a une anticipation de la restitution du CO₂ qui aurait, de toute façon, été réémis dans l'atmosphère du fait de la décomposition des arbres.

- les recherches sur les échanges et les flux thermiques et frigorifiques,
- et les recherches sur les techniques d'intégration des savoirs technologiques dans la conception et l'assemblage de ces bâtiments. Ce domaine de la maîtrise d'ouvrage combinée – qui est déjà mise en œuvre à l'échelle planétaire par les grands groupes hôteliers – sera central pour l'édification des parcs d'immeubles de services plus conformes aux exigences du développement durable.

(3) La consommation d'électricité

(a) Les consommations d'électricité spécifiques

Les consommations d'électricité spécifiques concernent l'électroménager, les produits informatiques et audiovisuels dans le résidentiel, et les seuls produits informatiques dans le tertiaire.

• Les produits électroménagers

La consommation d'énergie des produits électroménagers **a fait l'objet d'améliorations non négligeables alors que celle des produits informatiques et audiovisuels qui constituent depuis vingt ans un secteur d'équipement en pleine expansion a été plus négligée.**

En partie en fonction de l'action de l'Union européenne qui a donné lieu à la création d'un label de consommation (de A à G, en fonction décroissante de l'efficacité énergétique), les fabricants d'électroménager ont fait des efforts constants de diminution de consommation des équipements qu'ils proposent :

- la consommation des machines à laver a baissé de 44 % en 20 ans et celle des réfrigérateurs (le froid représente plus de 39 % de la consommation d'électricité d'un ménage) a baissé de 60 % depuis 1993,
- **en Europe, ces efforts ont abouti à une diminution de consommation équivalant au retrait de cinq millions de véhicules sur les routes.**

L'ensemble des fabricants européens ont des « feuilles de route » prévoyant la diminution progressive des consommations.

Mais ces efforts achoppent à un problème : actuellement, sur 633 millions d'appareils électroménagers en fonctionnement dans l'Union européenne, 188 millions, soit 16 %, ont plus de dix ans, ce qui correspond à plus de trois fois le marché annuel de ces produits.

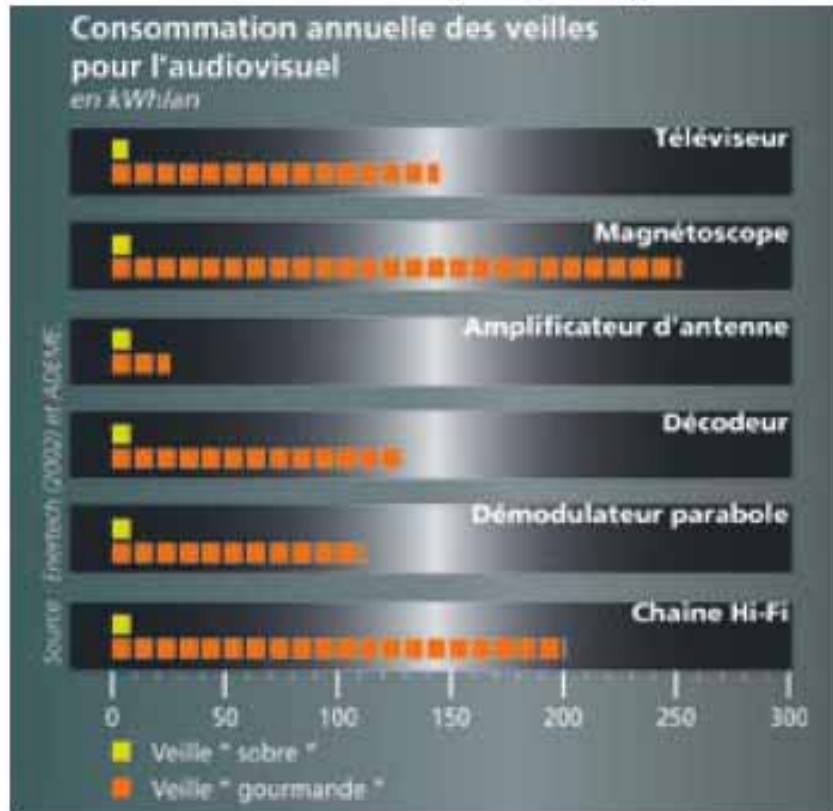
Or, le renouvellement de la partie la plus ancienne du parc s'effectue à un rythme lent car les recherches sur les économies d'énergie accroissent le coût des équipements ; ce qui fait que le retour sur investissement est lent, de l'ordre de 19 ans.

- **Les produits audiovisuels et informatiques**

A l'opposé, le **secteur** dit des produits « **bruns** » (ordinateurs, appareils audiovisuels), dont il faut noter qu'il représente une consommation globale plus faible (de l'ordre de 7 fois moins que l'électroménager), **n'a pas fait l'objet du même effort.**

A juste titre, le rapport précité de la MIES note que la consommation de ces appareils n'est pas prise en considération dans les décisions d'achat. **Il en résulte que leurs rendements ne sont pas optimisés lors de leur conception.**

Par ailleurs, ces appareils font l'objet de consommations parasites lorsqu'ils restent en veille en dehors de leur période d'utilisation effective. Ces consommations surnuméraires peuvent être importantes, de l'ordre de 100 à 800 KW/h par an pour un ménage.



C'est un domaine où l'amélioration des consommations est liée à l'édiction de normes plus sévères, car les technologies permettent à la fois de diminuer la consommation globale et d'éviter les états de veille prolongés non nécessaires.

(b) L'éclairage

Dans le monde, l'éclairage domestique et professionnel représente des consommations d'électricité équivalent à 15 % des émissions de CO₂¹ et **80 % de ces consommations s'effectuent en milieu professionnel.**

La diminution de cette consommation pourrait être obtenue par l'emploi de technologies existantes et fortement accrues par les technologies des diodes électroluminescentes (DEL).

¹ Dans le cas de production d'électricité par des centrales thermiques traditionnelles.

Les technologies disponibles permettraient de réduire fortement les consommations : lampes fluocompactes (- 80 %), lampes dichroïques (- 40 %) avec des durées de vie des ampoules plus longues.

De même, **une plus grande attention portée au pouvoir réflecteur des luminaires serait susceptible de diminuer de 20 % l'énergie dépensée dans les bureaux**. On peut également mentionner les systèmes annexes comme les détecteurs de présence qui interrompent l'éclairage dans les couloirs.

A terme, les technologies des DEL présenteront des potentiels intéressants (300 lumen/w contre 10 lumen/w pour les simples lampes à incandescence et 80 lumen/w pour les lampes fluo).

Par exemple, des études menées aux Etats-Unis ont montré que l'éclairage des vitrines de commerce par DEL aboutirait à des économies de 30 à 35 % (étant précisé qu'aux Etats-Unis l'éclairage représente 30 % de la consommation d'électricité).

Mais des progrès restent à faire dans ce domaine, tant en :

- **efficacité** : actuellement, les DEL ne délivrent que 20 lumen/Watt contre 80 pour les lampes fluorescentes modernes et 100 pour les lampes métal halide,

- **qu'en coût** :

- 0,6 \$ KLM pour les lampes à incandescence,
- 0,79 \$ KLM pour les lampes à fluorescence,
- 1,27 \$ KLM pour les lampes à métal halide,
- 250 \$ KLM pour les lampes à DEL.

Face à ces enjeux, une **feuille de route** a été établie, visant :

- pour 2007, à porter la puissance à 75 Lm/W et à rapporter le coût à 20 \$ par KLM,
- pour 2017, à porter la puissance à 150 Lm/W et le coût à moins de 5 \$ par KLM.

c) Les transports

(1) Un fort accroissement des besoins en combustibles fossiles

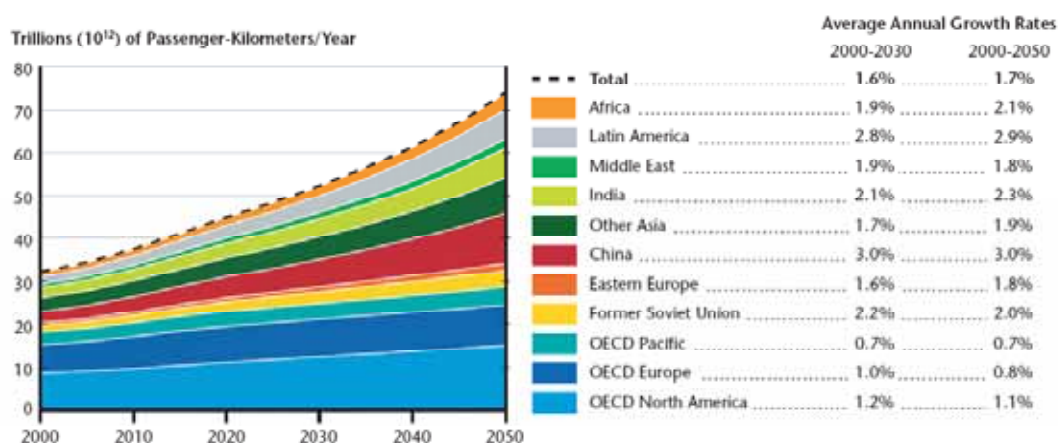
Actuellement, le transport est responsable de 24 % des émissions planétaires de CO₂.

Selon des données fournies par l'AIE, la part des transports dans la consommation mondiale de pétrole croît régulièrement :

- 33 % en 1971,
- 48 % en 2002
- 51 % en 2010.

A plus long terme, cette croissance devrait se maintenir. Ainsi, le nombre de milliards de passagers automobiles par km et par an est-il appelé à augmenter de 50 % d'ici 2030 et à doubler d'ici 2050.

Activité de transport de personnes par région



Source: **WBCSD – Mobilité durable 2030**
Données fournies par l'IEA

On rappellera aussi que le nombre de véhicules individuels devrait passer de 700 millions actuellement à 1,2 milliard en 2020 et à 1,4/1,5 milliard en 2030.

Le transport aérien croît par ailleurs à un taux de 5 %/an et le transport maritime à un taux de 6 %.

Nous vivons encore sur la tendance d'un demi-siècle de diminution des coûts de transport dont le besoin est renforcé par des aspirations légitimes à la mobilité et à la liberté de mouvement.

Tout concourt à cet accroissement des besoins en transports : le développement des échanges longue distance, l'économie du tourisme, le hiatus entre des emplois tertiaires concentrés dans les centres urbains et un habitat de plus en plus périurbain, et l'exigence de rapidité des livraisons et de capillarité fine des transports de marchandises que renforce encore l'économie de l'Internet.

A l'horizon d'une génération, cet accroissement des transports routiers et aériens qui utilisent des combustibles fossiles, producteurs d'émissions de gaz à effet de serre, semble difficile à contenir.

Il serait, au surplus, illusoire et peut-être hasardeux de remettre fortement en cause des modalités de transport dont dépendent très largement notre organisation sociale, nos modes de vie et des composantes éventuelles de notre activité économique. Mais des actions devront être entreprises pour infléchir certains des comportements sociaux qui aboutissent à des surconsommations inutiles de carburants fossiles.

En effet, il n'est pas possible d'accepter les effets dévastateurs qu'impliquerait la poursuite de cette tendance en termes d'accélération des effets du changement climatique.

Même s'il est plus que probable que la forte hausse du prix des carburants à intervenir d'ici dix à quinze ans (cf. 2e Partie supra) pourra éviter cette évolution, elle interviendra trop tard et ne pourra contenir la progression d'une consommation qu'il est, en tout état de cause, nécessaire de réduire.

Toutefois, si la progression de trafic semble difficile à endiguer, il existe des propositions scientifiques et technologiques pertinentes dont l'introduction limiterait, et les diffusions massives feraient réduire, les émissions de CO₂ dans le secteur des transports.

(2) Le transport routier

(a) Les limites des transferts modaux

Une esquisse de solution à l'accroissement des transports routiers pourrait être une dérivation vers d'autres modes de transport, notamment vers le rail.

Ce sont des pistes qu'il faut envisager.

Mais ces transferts sont coûteux, partiels et ne peuvent s'opérer qu'à très long terme.

Dans le domaine urbain, le rapport précité de la MIES précise que si l'on doublait les capacités des transports en commun en France, cela n'aboutirait qu'à faire baisser le trafic automobile de 8 %.

En matière de transport de passagers à longue distance, le déploiement de lignes de trains à grande vitesse est probablement un mode de substitution aux transports routiers individuels¹. Mais rappelons que **cette politique est à très long terme : il a fallu plus d'une génération pour déployer la moitié d'un réseau de TGV sur le territoire français.**

Le **transport de marchandises** pose des problèmes d'ordre différent.

- les ruptures de charges du rail font qu'il répond moins bien à la rapidité et à la capillarité fine exigée par ces usages.
- le croisement des courbes de coût des transports de marchandises par rail et par route ne s'opère au bénéfice du rail qu'entre 500 et 600 km.

Pour ces transports longue distance, des solutions existent, comme les transports intermodaux par feroutage, mais elles ne peuvent être mises en œuvre qu'au prix d'investissements très lourds et à long terme.

Il serait souhaitable qu'une action européenne soit entreprise sur ce point.

Pour le moins, une unification des réseaux de l'Europe des 25 serait nécessaire. Du fait de l'existence de trois largeurs de rail, de cinq systèmes électriques et de vingt systèmes de signalisation différents, la vitesse d'un **transport ferroviaire de marchandises entre la Pologne et l'Espagne évolue entre 20 et 30 km/h.**

(b) La réduction des consommations unitaires des véhicules

(i) Le bridage des véhicules

La question devra un jour se poser de savoir si une réglementation européenne ne devrait pas aboutir à ajuster la vitesse maximale des véhicules aux vitesses autorisées.

Mais, outre qu'elle impliquerait des problèmes lourds d'acceptation sociale, cette mesure aurait des effets plus emblématiques que réels.

Au demeurant, une politique fiscale adaptée pourrait, pour partie, s'y substituer.

¹ *Le déploiement du réseau TGV constitue une offre nouvelle qui fait qu'il est difficile de mesurer ce qui ressort de la substitution au trafic routier et au trafic aérien et ce qui relève d'un « effet d'aubaine » permettant d'aller, par exemple, de Paris à Marseille en trois heures.*

(ii) *L'amélioration des rendements des moteurs classiques*

Plusieurs voies peuvent être explorées.

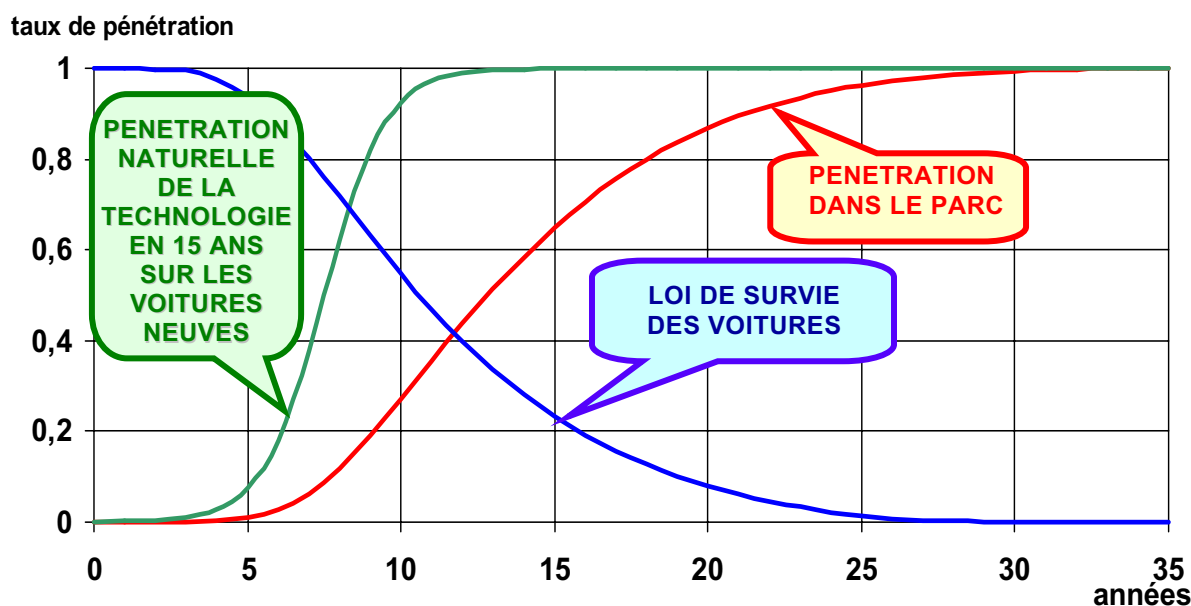
La dieselisation totale du parc entraînerait des économies de consommation supérieures à 20 %.

D'autres progrès, comme l'amélioration de l'injection directe, peuvent générer des économies (sur la thermisation à essence ou sur le diesel de l'ordre de 10 %).

Par ailleurs, **des marges de progression sont attendues des recherches sur les combustions homogènes qui visent à contrôler la vitesse et la température pour optimiser les résultats de la combustion.**

Mais comme l'ont noté MM. Cabal et Gatignol dans leur rapport présenté à l'Office sur « *La voiture du futur : moins polluante et plus économe* », **la pénétration de ces innovations technologiques dans le parc des voitures particulières est lente.**

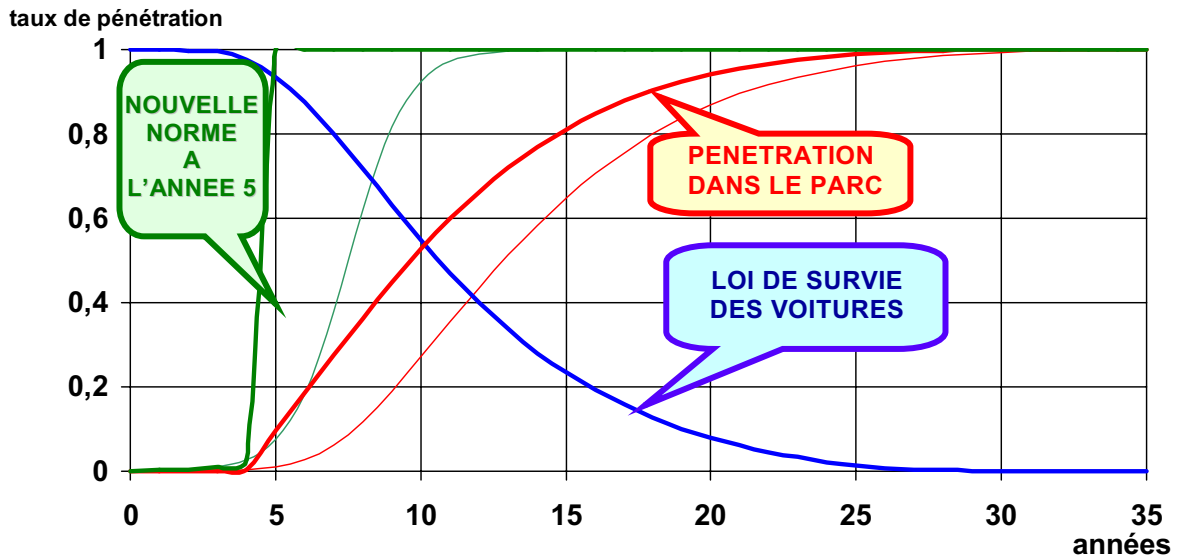
PENETRATION NATURELLE D'UNE TECHNOLOGIE DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERES



Source : C. Gallez – INRETS ADEME

Treize ans après son introduction, une nouvelle technologie n'équipera que 50 % du parc. Toutefois, des mesures normatives peuvent accélérer ces délais de 3 ans.

PENETRATION D'UNE TECHNOLOGIE DANS LE PARC DE VOITURES PARTICULIERES ACCELERATION PAR MISE EN PLACE D'UNE NORME



Source : C. Gallez – INRETS/ADEME

(c) L'hybridation

Près de 50 % des trajets automobiles font moins de 3 km, et 70 % ont lieu en cycle urbain avec de nombreux arrêts. Dans ces deux cas, le moteur met du temps à atteindre sa température normale de fonctionnement. Il en résulte qu'un véhicule roulant à 10 km/h émet, pour parcourir la même distance, trois fois plus de gaz à effet de serre qu'un véhicule roulant à 60 km/h. Par ailleurs, une énergie non négligeable est dissipée à l'occasion des multiples freinages propres au cycle urbain d'utilisation.

L'hybridation vise à récupérer cette énergie, à la stocker sur une batterie de puissance et à la restituer.

Cette technologie présente plusieurs avantages :

- elle répond, en partie, aux problèmes de surconsommation posés par l'utilisation des véhicules en cycle urbain puisqu'elle économise 25 % de carburant pour une utilisation urbaine des véhicules ;

- elle s'insère parfaitement dans les circuits de fabrication¹ et de distribution des véhicules et du carburant ;

- elle est incrémentale et fait l'objet d'améliorations progressives ; par exemple les gains d'économie de carburant en cycle urbain pourraient être prochainement portés au-delà de 30 %. De même, le poids de la batterie est passé de 67 kg dans le prototype à 39 kg dans les modèles proposés aujourd'hui ;

- elle est centrale et peut être couplée avec l'ensemble des améliorations portant sur les moteurs thermiques, sur les carburants ou sur les filières alternatives (hybride-diesel, hybride-biocarburants, hybride-électrique, hybride-combustion directe d'hydrogène, hybride-pile à combustible).

Actuellement, son coût de marché est de l'ordre de 4 000 \$ mais sa généralisation et la montée de la concurrence dans ce secteur pourront rapidement faire baisser ce coût, comme la hausse du prix du pétrole pourra accélérer son amortissement.

(d) Les biocarburants

L'utilisation de biocarburants n'est pas nouvelle. A la fin du 19^e siècle, les premiers moteurs diesel fonctionnaient à l'huile d'arachide.

Cette filière présente le triple avantage de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, de se substituer partiellement à une ressource en voie de raréfaction et de pouvoir s'insérer sans trop de problèmes dans les circuits de production et de distribution de carburants.

Plusieurs questions se posent :

Où en est-on concrètement ?

Entre l'espérance formulée par la Commission européenne de développer cette filière pour qu'elle représente jusqu'à 35 % de notre consommation actuelle de carburants dans les transports et la réalité de leur utilisation, il y a un écart.

En 2005, en Europe, le taux de remplacement de l'essence ou du gazole par les biocarburants évoluait entre 0,02 % pour le Royaume-Uni (dont la production est centrée sur le recyclage des huiles de cuisson) et 2 % pour l'Allemagne – la France se situant entre 1 et 2 %.

¹ avec peut-être le risque provisoire d'un goulet d'étranglement sur les batteries lorsque la production mondiale d'automobiles hybrides atteindra un niveau significatif (180 000 véhicules en 2005)

A ce niveau, on est encore assez loin de l'objectif de l'Union européenne d'inclure 5,75 % de biocarburants dans les carburants automobiles en 2010.

Actuellement, **deux grandes catégories de biocarburants** sont utilisées :

- l'éthanol issu du blé, du maïs (Etats-Unis), de la betterave ou de la canne à sucre (Brésil) qui est utilisé :

- soit directement (avec un taux de substitution à l'essence qui atteint 85 %, sous réserve d'une adaptation des carburateurs et des moteurs¹),
- soit sous forme d'ETBE (éthyl tertio butyl éther) à l'aide d'incorporation à 50 % d'isobutène, coproduit du pétrole,

- les esters végétaux (sous forme d'EMHV – esters méthyliques d'huiles végétales) produits à l'aide de la culture du colza, du tournesol, de l'huile de palme ou du soja). Ces esters sont incorporés au gazole. Cette incorporation est autorisée en France jusqu'à 30 % pour les flottes captives et jusqu'à 100 % en Allemagne avec des précautions particulières.

Il y a donc deux filières, l'une pour les moteurs à essence, l'autre pour les moteurs diesel.

• **Quel est le bilan réel de l'incorporation de biocarburants en matière de rendement énergétique ?**

Rappelons d'abord que le pouvoir calorifique des biocarburants est inférieur à celui des hydrocarbures. Ce pouvoir est mesuré en PCI (pouvoir calorifique inférieur) qui est de :

- 0,92 pour les EMHV/diesel,
- 0,66 pour l'éthanol/essence
- 0,33 pour les ETBE/essence.

Mais si le pouvoir calorifique de la filière éthanol est plus faible, son rendement à l'hectare est plus fort.

Le rendement énergétique (à PCI égal) des deux filières est difficile à évaluer puisqu'il dépend de l'importance et du prix des coproduits nécessaires à leur élaboration (engrais, carburants pour le transport, etc.).

Il existe deux méthodes d'évaluation de ce rendement, mais la méthode systémique paraît la plus complète et représentative du bilan d'introduction de la filière puisqu'elle incorpore, dans le calcul, les coproduits

¹ Dans l'Union européenne, cette utilisation directe au-delà de 10 % d'incorporation est interdite pour des motifs environnementaux et sanitaires car elle augmente la volatilité du produit.

qu'il faudrait employer pour remplacer les cultures auxquelles se sont substitués les biocarburants (par exemple le colza alimentaire qui n'est plus produit si on produit du colza à usage de biocarburants).

Les évaluations de l'Union européenne reprises par l'INRA donnent les bilans énergétiques suivants :

- 1,19 pour l'éthanol de blé et 1,28 pour l'éthanol de betterave,
- 2,5 pour les EMHV.

• Quelles sont les économies en matière d'émission de CO₂ générées par l'utilisation des biocarburants ?

Les estimations divergent.

Le rapport présenté par l'ADEME-DIREN calibre ces réductions de CO₂ à :

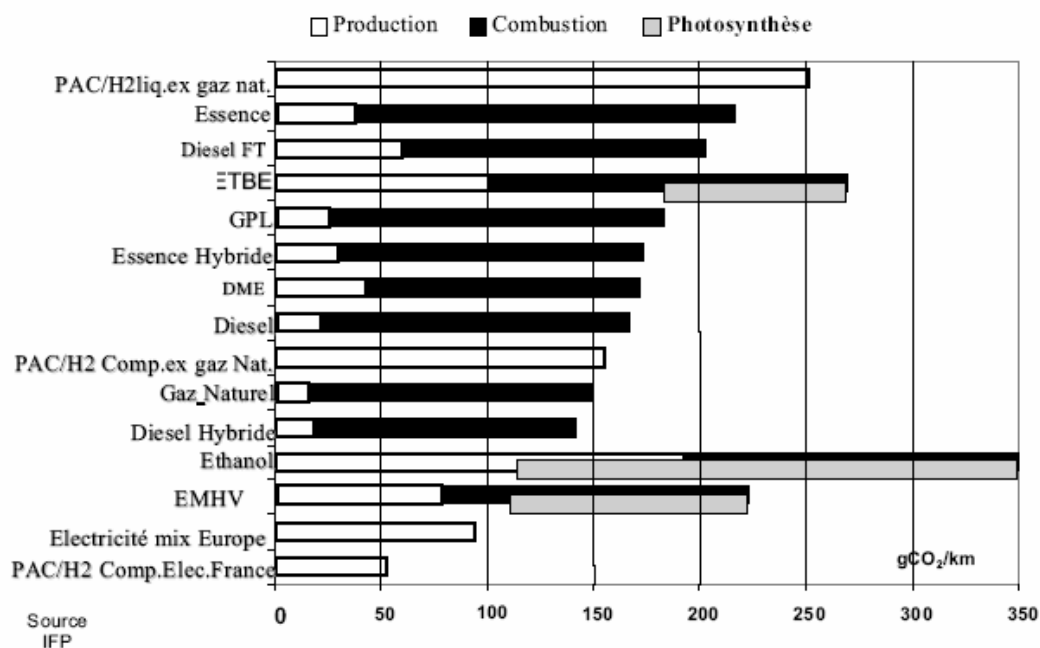
- 60 % pour l'utilisation directe d'éthanol par rapport à l'essence, mais seulement à 22 % pour les ETBE (qui incorporent un sous-produit pétrolier),
- de 70 à 90 % pour les esters par rapport au gazole.

Le rapport présenté conjointement par l'Inspection générale des finances, le Conseil général des mines et le Conseil général du génie rural et des eaux et forêts fournit des chiffres différents : les EMHV émettraient 3,5 fois moins de CO₂ et l'éthanol 2,5 fois moins de CO₂ que les carburants auxquels ils se substituent¹.

¹ Cette étude montre également que l'utilisation des biocarburants est beaucoup moins intéressante en matière d'émissions de gaz à effet de serre que l'utilisation directe de la biomasse pour produire de la chaleur. Ce qui est exact, mais ne répond pas aux problèmes posés par l'accroissement des émissions de gaz à effet de serre dans les transports.

Ainsi que l'ont souligné MM. Cabal et Gatignol dans leur rapport précité sur la voiture propre, une étude de l'IFP montre **que les biocarburants – du fait de la photosynthèse préalable des cultures – sont la seule solution alternative immédiatement disponible en matière de réduction de gaz à effet de serre :**

Emissions de CO₂ "du puits à la roue" : énergies actuelles et alternatives :



• **Quels sont les seuils économiques de rentabilité de la filière ?**

Les estimations disponibles entrent dans des fourchettes larges mais situent ces seuils à 75 \$-80 \$ le baril pour les esters et entre 90 \$ et 150 \$ le baril pour le bio-éthanol en incorporant à ce prix le coût des « bases essence » incorporées pour produire de l'ETBE.

*

* *

Au total, les biocarburants constituent donc une possibilité de substitution partielle aux carburants fossiles pour des usages dédiés au transport car leur bilan en émission de CO₂ est satisfaisant et ils arrivent à maturité économique.

Et même si la filière esters-gazole semble présenter plus d'avantages que la filière éthanol-essence, il conviendra de continuer à encourager les deux compte tenu de l'état du parc (deux tiers/un tiers pour les véhicules individuels) et des meilleurs rendements à l'hectare de l'éthanol.

Le Gouvernement français a décidé, le 1^{er} septembre 2005, d'atteindre en 2008 l'objectif de 5,75 % d'incorporation fixé par l'Union européenne pour 2010, et de porter ce taux d'incorporation à 7 % en 2010 et à 10 % en 2015.

• Quelles sont les perspectives d'amélioration technologiques de la filière ?

Elles sont de plusieurs ordres.

Il convient d'abord de régler le problème de la concurrence d'occupation des sols entre les usages agricoles et les usages non agricoles (dont les biocarburants, mais également la chimie verte qui fait l'objet d'un projet de l'AII). Par exemple, dans le cas de la France, l'objectif d'incorporation de 5,75 % de biocarburants qui devait être atteint dès 2008 suppose de consacrer 75 % de la production de colza à cet usage contre 25 % en 2004.

Cela suppose également d'utiliser 2 millions d'hectares, soit plus que 1,2 million d'hectares de jachères disponibles.

Il est donc nécessaire de trouver des cultures à la fois pertinentes pour cet usage et n'entrant pas, à terme, excessivement en concurrence avec d'autres usages.

Deux voies agronomiques sont envisagées pour les carburants de deuxième génération :

- le développement de céréales à fort taux de matière sèche, (tritical) qui offrent l'avantage de présenter des sous-produits pour la nourriture du bétail et donc de pouvoir être implantées sur une partie de la surface de prairies qui représente le tiers des terrains disponibles¹,

- l'utilisation d'une filière lignocellulosique (par exemple le peuplier) avec des systèmes de rotation de cultures courtes – de l'ordre de 5 à 7 ans – qui présente l'intérêt de n'utiliser des intrants polluants que lors de la première année de culture.

¹ En gros, en France le territoire rural se partage entre 1/3 de cultures, 1/3 de prairies et 1/3 de bois.

Par ailleurs, des technologies assez simples seront en mesure de réduire les consommations intermédiaires de la filière et donc d'améliorer son bilan aussi bien en termes énergétiques que de gaz à effet de serre.

L'institut allemand FZK (Forschung Zentrum Karlsruhe) a mis au point une technologie qui repose sur l'élaboration de biocarburants à partir de paille en passant par un produit intermédiaire. Un des intérêts de cette **approche est que ce produit pourrait être élaboré dans 70 centres en Allemagne et acheminé par rail dans trois centres terminaux pour être transformé en biocarburant.** Ce qui élimine – pour autant que l'électricité nécessaire au transport ferroviaire soit produite sans émission de gaz à effet de serre – une partie des consommations intermédiaires d'hydrocarbures.

Deux axes de recherche permettront d'améliorer l'efficacité énergétique intrinsèque des transformations de la biomasse en biocarburants :

- la voie **thermochimique**, par gazéification puis production de gazole, qui arrivera à maturité industrielle vers 2015,
- et la voie **biochimique dite d'hydrolyse enzymatique** afin d'optimiser la production d'éthanol à l'aide de bactéries qui devrait arriver à maturité industrielle vers 2010.

(e) Les carburants de synthèse

La production de carburant de synthèse à partir du charbon (technique dite « Fisher Tropsch ») date des années vingt du siècle précédent. Elle a été utilisée par les Allemands au cours de la Seconde guerre mondiale. En l'état, elle pose principalement deux problèmes : son rendement est mauvais et, surtout, elle est fortement émettrice de gaz à effet de serre.

Son développement est donc pendant au déploiement massif de la filière captation-séquestration du charbon.

(f) Les filières alternatives

Quel que puisse être l'intérêt des possibilités de substitution qu'offrent déjà les biocarburants et la marge de progrès qu'apporterait la diffusion de l'hybridation automobile, on mesure bien que **la poussée difficilement endigable des besoins du transport routier dans le monde suppose que l'on fasse appel à des filières alternatives qui n'auraient pas les inconvénients du moteur thermique en matière d'effet de serre.**

Les travaux scientifiques et technologiques portent principalement sur deux de ces filières : **la voiture électrique et la filière hydrogène.**

(i) La voiture électrique

Le développement des véhicules électriques particuliers est pendant à des progrès dans la technologie transversale du stockage de l'électricité et plus précisément à des améliorations dans plusieurs domaines :

- **Les coûts d'investissement et d'entretien** sur lesquels peu d'informations sont disponibles compte tenu du manque de marché de masse. A l'opposé, il faut noter que les coûts directs d'utilisation de ce type de véhicule sont relativement faibles, intrinsèquement et parce qu'ils ne supportent que la TVA et non la TIPP.

- **Le coût du fluide** : la simple recharge sur secteur ferait ressortir un coût d'un euro les 100 km, d'un ordre de grandeur 10 fois inférieur au coût des carburants classiques à la pompe ;

- **L'autonomie**

Des raisonnements théoriques aboutissent à estimer qu'une autonomie de 30 à 50 km répondrait aux deux tiers des utilisations journalières des véhicules individuels.

Si ce type de raisonnement peut, sous réserve des problèmes liés à la recharge des batteries, qualifier le véhicule électrique de « second » véhicule d'un foyer, il ne répond pas aux exigences d'une utilisation complète d'un véhicule individuel dont les consommateurs ne peuvent séparer les usages entre les déplacements quotidiens, les week-ends et les départs en vacances.

Les prototypes pré-industriels disponibles sur le marché commencent à atteindre une autonomie proche de 200 km, sans que soient réellement précisées les vitesses moyennes liées à ce degré d'autonomie.

- **Les temps de recharge posent également problème**

Dans un cycle d'utilisation urbain quotidien, la recharge nocturne ne peut s'effectuer que si des bornes de recharge sont disponibles¹. Pour une utilisation plus extensive le problème de la recharge foraine se pose.

La solution réside probablement dans l'échange standard de batteries, ce qui suppose une technologie adaptée et un déploiement de réseaux de distribution.

- **La fiabilité à long terme**, qui dépend de la résistance des batteries aux cycles charge/recharge pour des utilisations moyennes de véhicules de l'ordre de 12 500 km par an et pour un parc où 50 % des véhicules ont au moins plus de dix ans.

¹ Des villes comme La Rochelle ont mis en place des bornes publiques de recharge qui donnent 20 km d'autonomie en 10 minutes.

*

* *

La filière de la voiture électrique, en dépit des interrogations qu'elle suscite encore, s'approche peu à peu de sa maturité industrielle.

Mais son déploiement sera principalement entravé par les coûts de déploiement d'un système de distribution complet.

C'est pourquoi, dans un premier temps, il serait souhaitable d'encourager le développement **des flottes captives** en voie de constitution auprès d'EdF et de La Banque postale, mais **assez peu présentes dans les transports en commun locaux**.

Toutefois, une voie d'introduction de la filière réside dans le développement de véhicules hybrides rechargeables (VHR) qui permettraient de répondre à la double utilisation des véhicules individuels (déplacements quotidiens à faible rayon kilométrique, déplacements des week-ends et des vacances à moyenne et longue distances).

Des travaux d'EdF et de l'ADEME montrent que ces VHR (à 10 ou 60 km d'autonomie) présentent des bilans d'émissions de gaz à effet de serre près de deux fois inférieurs à ceux des véhicules conventionnels.

Évaluation des émissions de CO2 du puits à la roue selon la motorisation

Type de véhicule	Puits au moteur (g CO2/km)	Moteur à la roue	Émissions totales
Conventionnel	20 à 35	130 à 180	150 à 210
Hybride	24	104	128
Electrique	10 à 14	0	10 à 14
VHR 10	22	73	95
VHR 30	21	52	73

Source : EDF/ADEME

(ii) La filière hydrogène

Depuis plus d'une décennie, l'économie de l'hydrogène est identifiée comme une des solutions de substitution à l'économie pétrolière qui a porté le développement de la planète depuis plus d'un siècle.

Mais sa **maturation technologique et économique est lente.**

Cette filière peut-elle présenter une alternative aux hydrocarbures dans le transport routier et à quelle échéance ?

Pour apporter des éléments de réponse à cette question, il est nécessaire d'examiner chaque étape de cette filière : la production d'hydrogène, son stockage, sa distribution et son utilisation dans le transport routier.

• **La production d'hydrogène**

Actuellement la production mondiale d'hydrogène à usage industriel (fabrication d'ammoniac, raffinage pétrolier) est d'environ 50 millions de tonnes ; elle utilise à plus de 96 % des combustibles fossiles émetteurs de gaz à effet de serre.

Trois voies principales de filières traditionnelles existent :

- la production par électrolyse à haute température, soit pour des réacteurs nucléaires de génération IV, soit dans un cycle de captation/séquestration du charbon, seule énergie fossile encore abondante,
- l'utilisation de la biomasse pour la production de gaz de synthèse transformé en hydrogène,
- et la production par utilisation des biogaz.

Seules la première de ces solutions est intéressante en matière d'émissions de gaz à effet de serre.

Mais il faut insister sur deux points :

- **Remplacer la totalité du pétrole utilisé dans le transport routier exige un déploiement gigantesque d'installations.** Rappelons un chiffre déjà cité, pour substituer l'hydrogène au carburant fossile utilisé pour le transport routier aux Etats-Unis : il faudrait construire près de 800 installations de production, ce qui semble exclure toute utilisation d'une biomasse – de toute façon insuffisante – et qui devrait être, dans un premier temps, dédiée à la fabrication de biocarburants.
- **Les coûts actuels de la seule fabrication d'hydrogène, à pouvoir calorifique égal, équivalent à 120 \$ le baril sur la base de l'utilisation du gaz naturel.**
- La mise en œuvre d'une filière fondée sur le charbon de **captation/séquestration/fabrication d'hydrogène doublerait ces coûts.**

Ces deux considérations donnent à penser que le transfert définitif du pétrole à l'hydrogène pour assurer nos besoins de transport ne pourrait être accompli qu'à l'aide d'installations massives de production assurant des coûts de production d'hydrogène « du puits à la roue » équivalents à 100-150 \$ le baril. En d'autres termes, il faudra attendre le déploiement des réacteurs nucléaires de génération IV à partir de 2035.

- **Le stockage de l'hydrogène**

L'hydrogène a un pouvoir calorifique important. 5 à 7 kg de produit assurent une autonomie de l'ordre de 500 km. Le problème est qu'à température ambiante 1 kg occupe un volume de 12 m³.

Mais il existe des **réponses technologiques** :

- La compression

Trois kg d'hydrogène comprimé à 200 bars permettent d'assurer une autonomie de 300 km mais exigent un réservoir de 200 kg d'un volume encore important.

Les progrès technologiques visent à augmenter la pression pour diminuer les volumes et à travailler sur les matériaux du réservoir pour en diminuer le poids.

- La liquéfaction

Elle présente l'inconvénient de réduire de près d'un tiers le pouvoir calorifique de l'hydrogène mais l'avantage de pouvoir stocker le fluide dans des volumes plus compatibles avec une utilisation automobile. C'est la solution choisie par BMW pour son véhicule hybride à combustion directe d'hydrogène (*cf. infra*).

- Le stockage solide

Il s'agit de pistes technologiques consistant à stocker l'hydrogène soit dans des cristaux de métal, soit à l'aide de nanotubes de carbone.

En l'état, et quelles que soient les contraintes physiques du vecteur hydrogène, les problèmes de stockage de l'hydrogène pour des utilisations automobiles semblent être en voie de solution.

- **La distribution de l'hydrogène**

Un bref retour en arrière permet de constater que le déploiement de l'économie pétrolière s'est effectué très progressivement¹.

Le défi d'un passage à l'économie de l'hydrogène est tout autre. Il s'agit de faire monter en puissance une filière de substitution en offrant des services de distribution analogues à la filière pétrole.

Actuellement, seulement 70 installations de distribution d'hydrogène existent dans le monde.

Deux solutions cohabitent :

- l'hydrogène distribué qui utilise des dérivations de gazoducs industriels comme celui des installations de Total à Berlin qui alimentent une flotte de bus captive ;
- l'hydrogène fabriqué sur place, comme l'autoroute de l'hydrogène mise en œuvre en Californie, ou les installations expérimentales de l'aéroport de Munich qui servent de l'hydrogène soit sous forme gazeuse, soit sous forme liquide.

Mais ces installations sont expérimentales.

Le déploiement d'un système complet de distribution – qui devrait de toute façon cohabiter avec le réseau existant et, le cas échéant, avec un réseau d'échange de batteries dans l'hypothèse d'un développement des voitures électriques – serait très coûteux. **Une estimation de General Motors chiffre cette charge pour les Etats-Unis entre 10 et 15 milliards de \$.**

- **Les modes d'utilisation de l'hydrogène dans le transport routier**

L'hydrogène peut être principalement utilisé de deux façons, en combustion directe ou transformé en électricité par une pile à combustible :

- **La combustion directe de l'hydrogène**

La combustion directe de l'hydrogène est utilisée sur des flottes d'autobus captives, en particulier à Berlin et à Munich, dans le cadre d'un programme européen.

Elle fait, en outre, l'objet d'une démonstration d'automobiles hybrides menée par BMW dont la commercialisation pourrait s'opérer à partir de 2008-2009. La partie hydrogène de ce véhicule hybride assure une autonomie propre de 200 km et le plein se fait en 6 mn (au lieu de 10 mn au début de l'expérience) auprès de la station expérimentale de l'aéroport de Munich.

¹ Dans les années 1900, les utilisateurs d'automobiles emportaient leur combustible avec eux-mêmes pour couvrir de moyennes distances.

– **La pile à combustible**

Le principe de la pile à combustible repose sur la réversibilité de l'électrolyse.

Les rendements thermiques en sont élevés (de 80 à 95 %) mais compte tenu de la chaleur dissipée le rendement électrique pratique évolue entre 40 et 60 %.

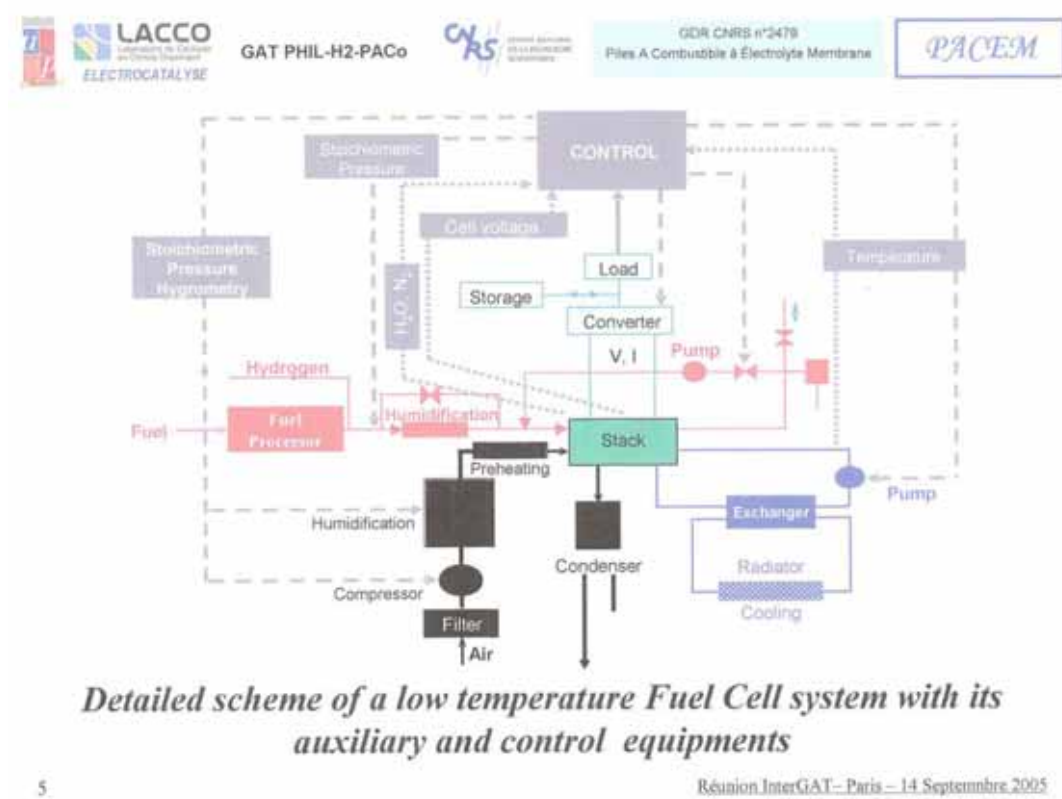
Les premières piles à combustible ont été utilisées dans les capsules Gemini et délivraient une puissance d'1 KW pour un poids de 20 kg (actuellement, 3 piles donnant chacune 12 KW pour un poids de 90 kg sont utilisées sur la navette spatiale). Les progrès techniques sont donc évidents.

Par ailleurs, commencent à être proposés sur le marché des téléphones portables, des piles à combustible qui ont une autonomie deux fois plus élevée que les accumulateurs classiques et fonctionnent à l'aide de recharges d'hydrogène.

L'extension massive de cette technologie aux transports routiers n'est pas encore acquise industriellement.

Indépendamment des difficultés et des coûts propres à la diffusion de la filière hydrogène dans les transports (essentiellement production et infrastructures de distribution), des problèmes spécifiques à cette technologie sont nombreux :

- **l'encombrement du dispositif** qui exige de nombreux éléments auxiliaires et de contrôle venant se surajouter à la place prise pour les cœurs de pile :



- **La sûreté de fonctionnement** sur des durées longues (200 000 km pour une automobile).
- Les coûts, la plupart des personnes entendues estimant qu'il fallait –indépendamment du coût de production et de distribution de l'hydrogène – **réduire le coût du dispositif d'un facteur 50 à 100 pour le rendre accessible au marché.**
- **Le coût du platine** : dans l'état actuel de la technologie, tout repose sur le platine comme élément de catalyse. Or on extrait seulement 200 à 300 tonnes de ce métal par an, ce qui représente, à raison de 10 grammes par automobile, seulement 20 millions de véhicules. **A l'opposé**, il faut souligner que 99 % du platine utilisé dans les piles seront recyclables et que des percées technologiques effectuées au CEA montrent que l'utilisation de nanotechnologies permettrait de réduire par 10 le poids de platine nécessaire au dispositif des piles à combustible.

Au total, si certains éléments de la filière hydrogène sont mûrs technologiquement, d'autres ne le sont pas. **Et, en tout état de cause, à l'horizon d'une génération, l'utilisation massive de cette filière pour les transports semble économiquement peu crédible**, son développement risquant d'être entravé par la montée progressive d'autres filières de substitution au pétrole (biocarburants, véhicules hybrides ou électriques).

Mais, dans la mesure où on estime :

- qu'à compter de 2035-2040 le déploiement des réacteurs nucléaires de génération IV permettrait de produire de l'hydrogène à des coûts compétitifs et sans émission de gaz à effet de serre,
- et que des progrès technologiques importants sont à venir dans ce secteur,

la filière hydrogène doit continuer à être encouragée.

Celle-ci pourrait en priorité s'appliquer aux flottes captives (hybrides ou fonctionnant totalement à l'hydrogène), en particulier de transports en commun. Dans un second temps des actions complémentaires pourraient être menées dans le domaine du fret routier européen à long rayon d'action sur des axes prédéfinis qui pourraient être plus facilement dotés d'une infrastructure de distribution (par exemple un axe Nord-Sud et un axe Est-Ouest).

(3) Le transport aérien

Chacun s'accorde à reconnaître que les hydrocarbures disponibles devront progressivement être réservés au trafic aérien.

Celui-ci transporte déjà 1,8 milliard de passagers par an avec une croissance annuelle de 5 % ; cela signifie que dans une vingtaine d'années on transportera en trois jours autant de passagers que l'on en transporte en une semaine aujourd'hui.

Le transport aérien assure également 40 % de l'échange international de marchandises et ce trafic croît régulièrement.

Cette augmentation du trafic provoque des hausses de consommation collatérales dues à l'encombrement des espaces aériens au-dessus des aéroports.

L'avionique gagne de 1 à 1,5 % de point de consommation de kérosène par an, mais ces gains sont inférieurs à la progression du trafic ; il est donc nécessaire d'**amplifier la mise en œuvre de technologies réduisant la consommation de kérosène, aussi bien dans le domaine des réacteurs que dans celui de la conception générale des avions. Il faut également activer**

les gisements d'économies de carburant qui existent dans le domaine de la navigation aérienne.

• Les réacteurs

La réduction des émissions de gaz à effet de serre par les réacteurs d'avions passe par :

- une amélioration de la qualité du kérosène qui diminue les rejets en oxydes de soufre contributeurs de la formation de cirrus,
- une amélioration de la conception d'ensemble des moteurs afin de réduire les émissions de CO₂,
- et une amélioration des chambres de combustion afin de diminuer les émissions d'oxydes d'azote.

Mais, sur les deux dernières données, il faut garder à l'esprit :

- qu'entre le lancement d'une nouvelle génération de moteur et sa réalisation, la durée est d'environ 14 ans ;
- et qu'un moteur d'avion est toujours un compromis entre la consommation, les émissions de gaz, le bruit et les coûts de maintenance.

Actuellement, les objectifs en vue pour 2020 portent sur des moteurs capables de réduire les émissions d'oxyde d'azote de 80 % et de gaz carbonique de 50 % tout en réduisant de 10 décibels le bruit résultant de chacune des phases suivantes : roulage sur pistes, décollage, atterrissage.

La réalisation de cet objectif passe par un premier palier en 2012 permettant de fabriquer un réacteur consommant 7 % à 12 % de moins (suivant que le vol est court-moyen courrier ou long courrier).

Au-delà, pour réaliser les objectifs très ambitieux de l'horizon 2020, des ruptures **technologiques déjà identifiées seront nécessaires** dans des secteurs aussi variés que :

- le contrôle actif fluïdique, l'aspiration sur les aubages ;
- le pilotage actif de combustion (plasma, injection pulsée...) ;
- le contrôle actif de bruit ;
- les matériaux et les revêtements nano-structurés ;
- les échangeurs à très haute efficacité ;
- les structures allégées ;
- et les intégrations motrices innovantes, etc.

- **Les avions**

Aucune rupture technologique majeure n'est envisageable dans l'avionique, parce que les contraintes de manœuvre au sol de l'avion s'y opposent et que la conception de nouvelles familles d'avions est incrémentale compte tenu des coûts de développement.

Cependant, les recherches technologiques aéronautiques sont réelles et se concentrent sur plusieurs domaines :

- les changements de cambrure de la voilure qui permettraient d'économiser 1 à 2 points de consommation par an ;
- l'intégration du moteur dans la cellule (afin de diminuer le bruit des réacteurs, on a accru la surface des moteurs qui sont donc plus difficiles à intégrer dans la cellule, ce qui produit des contraintes aérodynamiques et un accroissement de la consommation) ;
- l'introduction croissante de matériaux composites pour créer des économies de masse, étant précisé que cette intégration ne peut être que progressive, car les coûts de recherche sont très élevés alors que les quantités unitaires sont relativement faibles.

On notera également qu'en matière de vitesse, les possibilités concrètes de réduction de la consommation sont restreintes du fait des caractéristiques de l'exploitation. Par exemple, sur les longs courriers réduire la vitesse aboutit à un accroissement du nombre des équipages requis.

Des possibilités non négligeables existent aussi dans le domaine du mobilier. **Paradoxalement, alors que les ingénieurs aéronautiques multiplient les innovations pour limiter le poids des aéronefs, le poids du mobilier n'a pas évolué depuis les années soixante-dix.**

Pour un Airbus A380, le poids de ce mobilier est de l'ordre de 25 à 30 tonnes, suivant les modules d'équipement, pour un poids total de 360 tonnes, soit 5 % de l'ensemble. Autre illustration, **le poids total de ces équipements (fauteuil, chariots, nourriture) est de 210 kg, pour un passager de classe affaires sur un long courrier.**

- **La navigation aérienne**

Les gains d'émission de CO2 qui pourraient résulter d'une amélioration de la gestion de la navigation aérienne sont évalués entre 5 et 15 %.

Un rapport d'Eurocontrol estime qu'en comparant les technologies de 2020 et celles d'aujourd'hui les marges de progrès seraient de :

- 4 % pour la phase de croisière « en route »,
- 2 % grâce au respect des trajectoires par les compagnies aériennes,
- et 2 % grâce à une optimisation des « tactiques » du contrôle aérien.

Par ailleurs, une meilleure attention portée aux phases préalables au décollage pourrait faire l'objet d'économies de carburant :

- le roulage sur piste : le tractage des avions par des tracteurs électriques ou l'implantation de moteurs autonomes dans les trains d'atterrissage diminuerait l'utilisation des moteurs d'avions pendant cette phase ;
- une meilleure gestion des mises en route des avions au départ permettrait de diminuer les attentes au sol moteurs en route ;

3. L'impact des technologies transversales

Ces technologies peuvent s'appliquer aussi bien à la production d'énergie qu'à la mise en œuvre de meilleurs usages de l'énergie.

a) Les nouvelles technologies de l'information et de la communication

La numérisation de la société, la miniaturisation des objets électroniques, le couplage des télécommunications avec des moyens de calcul de plus en plus puissants ont déjà des effets sociaux que chacun peut mesurer.

Dans le domaine du développement durable, **ces avancées scientifiques et technologiques ont été décisives pour la mesure du changement climatique** qui exige à la fois des infrastructures d'observation satellitaires et terrestres développées et une puissance de calcul qui permet de modéliser des phénomènes extrêmement complexes.

Vis-à-vis de l'exigence d'économies qu'implique un développement plus durable, ces technologies sont porteuses de propositions très variées, qu'il s'agisse de modifier les usages sociaux ou d'approfondir nos connaissances des réactions de l'infiniment petit.

(1) Vers de nouveaux usages sociaux

Nous allons vers un monde où le transport de l'information a des coûts décroissants très rapidement et où le coût du transport des hommes augmente.

D'où l'importance nouvelle des technologies de télé-enseignement, téléconférences, télémédecine et télétravail.

Dans ce dernier domaine (qui peut mobiliser jusqu'à 25 % de l'emploi salarié aux Pays-Bas ou en Finlande), on assiste à une évolution, perceptible aussi aux Etats-Unis, qui tend à privilégier soit le télétravail à domicile, soit le télétravail dans des centres dédiés.

Il n'est pas utile d'insister sur les gisements d'économies d'énergie liées au transport que représentent ces nouveaux usages sociaux.

(2) L'optimisation des réactions de l'infiniment petit

Les technologies de modélisation commencent à s'appliquer à la connaissance des réactions de l'infiniment petit.

On en donnera deux illustrations.

Des études sont menées à l'INRIA et à l'IFP pour comprendre le fonctionnement des moteurs à explosion (essence ou diesel) dont les mécaniques de combustion impliquent des milliers de molécules. Il s'agit d'essayer de trouver une amélioration des combustibles et de la configuration des moteurs pour réduire les réactions qui se produisent au moment de la combustion d'un ordre de grandeur de plusieurs milliers à plusieurs centaines. **afin d'augmenter l'efficacité énergétique du moteur thermique.**

L'INRIA mène également à Sophia Antipolis des recherches sur la production d'énergie, et notamment du méthane, par fermentation anaérobie des bactéries. Avec l'objectif de stabiliser les gaz ainsi obtenus pour faciliter leur utilisation.

b) La conversion thermique

Des champs d'investigation importants existent dans le domaine de la thermodynamique :

- sur les transports et les échanges de chaleur à très haute température (en vue de la fabrication d'hydrogène à 700°C ou plus),
- sur les échanges multifonctionnels des réacteurs thermiques afin de pouvoir réaliser en continu des opérations de nature différente,
- sur le stockage de la chaleur et du froid qui est, actuellement, réalisé à l'aide d'équipements surdimensionnés,
- sur les réseaux de transport de la chaleur et du froid.
- et, enfin, sur la recherche de matériaux à changement de phase croisant des transferts chaleur-froid et froid-chaleur,

Dans ce domaine des réalisations déjà anciennes – notamment la climatisation à l'aide de stockage de frigories ou calories par boules remplies de sels qui cristallisent ou fondent à température déterminée – existent et des PME fonctionnent depuis plus de trente ans.

c) La distribution de l'électricité

(1) La conversion

Le simple fait d'éteindre ou de rallumer un interrupteur occasionne une chute de tension et donc des pertes de conduction qui augmentent la consommation électrique. De façon générale, le rendement de ces convertisseurs d'énergie évolue entre 80 et 95 %. Les travaux menés actuellement à l'aide de nouveaux matériaux visent à réduire les pertes dues à ces conversions.

D'autres recherches portent sur les pertes occasionnées par la transformation du courant continu produit à l'aide d'énergies renouvelables (éolien, photovoltaïque) en courant alternatif. Les onduleurs les plus perfectionnés arrivent maintenant à effectuer cette conversion avec un rendement de 95 %.

Une percée technologique assez prometteuse a été effectuée dans le domaine des contacteurs. Un procédé qui utilise la mousse d'argent réduit de 30 % les pertes dues au contact pour l'électronique de puissance, notamment en matière d'électrolyse ou pour les piles à combustible. Cette technologie, qui est **utilisée à l'échelon industriel, pourrait être généralisée aux 30 millions de compteurs électriques français, et aboutir à une économie de consommation d'électricité de l'ordre de 1 %.**

(2) Les réseaux de distribution

Il convient d'abord de relever que les interconnexions entre les réseaux européens ne sont pas assurées dans de bonnes conditions. Il est prévu, dans le 7^e PCRD, de renforcer l'intelligence de ces réseaux, car une harmonisation permettrait d'économiser de 20 à 30 % de l'énergie dispersée à l'occasion de leurs échanges d'électricité.

A l'avenir, il sera aussi nécessaire de passer de réseaux historiques centralisés à des réseaux plus décentralisés permettant d'insérer, dans les circuits de distribution, les microproductions générées par les énergies renouvelables.

De plus, à l'échelle nationale, cette mise en place de réseaux de distribution intelligents et autorégulés pose le problème de leur automatisation. Ce qui introduit toujours des compromis entre les coûts de déploiement (notamment de capteurs) et leur capacité à reconstituer la continuité des réseaux en cas de problème. D'où un travail nécessaire sur des algorithmes de précision. D'où également un problème de coût des télécommunications, de fonctionnement et de déplacement permettant à ces réseaux de fonctionner.

Enfin, se posera de plus en plus le problème de l'information du consommateur final (et, le cas échéant, du consommateur-producteur d'électricité). Le développement de compteurs intelligents avec des systèmes d'information et d'alerte intégrés est un enjeu important de la transition énergétique. Mais la mutation des 30 millions de compteurs individuels existant en France ne pourra être que lente car sa charge est évaluée entre 3 et 4 milliards d'euros.

d) Le stockage de l'électricité

Le stockage de l'électricité est appelé à devenir un secteur stratégique de la transition énergétique.

Les interfaces entre des énergies renouvelables dont la production est intermittente et la nécessité de progresser dans le domaine des véhicules électriques appellent au développement de systèmes d'accumulation et de restitution de l'électricité :

- plus performants,
- à durée de vie plus longue,
- et à moindre coût.

Dans le secteur des véhicules électriques, les propositions scientifiques évoluent entre la poursuite d'un processeur incrémental d'amélioration et l'espérance de ruptures technologiques.

Rappelons que l'usage automobile des accumulateurs doit concilier deux exigences : celle de la fourniture lente d'un maximum d'énergie et la fourniture instantanée d'une forte puissance.

A partir des technologies de batteries aujourd'hui utilisées, les principaux axes de développement concernent :

- les accumulateurs nickel-fer qui permettent de délivrer une puissance satisfaisante à un coût intéressant,
- les accumulateurs au zinc, dont les coûts et les performances semblent intéressants,
- les batteries dites « metal-hydrures » qui délivrent beaucoup d'énergie mais génèrent des surcoûts importants,
- les batteries « lithium-polymères » qui font l'objet de développements technologiques avancés,
- la filière « lithium-ions » qui est à la fois très coûteuse et pose des problèmes non négligeables de sécurité. En l'état, cette filière semble être la plus prometteuse car elle serait porteuse de gains d'énergie de l'ordre de 30 % et de gains de puissance supérieure (batteries lithium-ions de grande puissance). Mais sa généralisation exigerait que l'on fasse également des progrès sur le coût du matériau employé, le lithium.

A terme, des ruptures technologiques sont attendues dans les domaines prénanotechnologiques du stockage à l'aide de nanotubes de carbone qui permettraient de régulariser les flux de lithium.

Pour ce qui concerne les usages stationnaires, de l'électricité, les recherches s'orientent vers des perspectives à plus long terme, sur des systèmes mixtes de cogénération et d'utilisation de l'hydrogène comme combustible, faisant coexister batteries et piles à combustible.

II. LES PROBLÈMES LIÉS À L'INTRODUCTION DES FILIÈRES DE SUBSTITUTION

La nécessité de réduire, en l'espace d'une génération, l'utilisation des combustibles fossiles dans les secteurs directeurs de consommation que sont la production d'électricité, le « résidentiel-tertiaire » et les transports est un défi d'une grande ampleur.

Face à cette exigence, l'offre de la science et de la technologie présente un éventail très large de propositions dont il faut souligner qu'aucune ne constitue une solution exclusive.

Il est donc plus que jamais nécessaire de synchroniser la mise en œuvre d'un ensemble de filières alternatives.

Mais l'introduction de ces filières de substitution est gouvernée par des éléments d'arbitrage différents : des éléments économiques extérieurs, des éléments liés à l'inflexion des comportements sociaux et des éléments intrinsèques à chaque filière.

A. DES ÉLÉMENTS ÉCONOMIQUES EXTÉRIEURS

1. Les prix et l'accessibilité du pétrole et du gaz naturel

Il n'est pas utile d'insister sur le caractère directeur de cette variable – largement abordée en seconde partie de ce rapport – sinon pour souligner que son évolution introduit une distorsion dans le calcul économique lié à l'introduction de filières alternatives.

Car le choc pétrolier – et le choc gazier qui suivra – n'interviendront pas avant dix ou quinze ans alors qu'un pétrole à 75 \$-80 \$ le baril ne perturbe pas excessivement l'économie mondiale. **Cette évolution différée du prix du pétrole peut disqualifier ou retarder des investissements – à la fois coûteux et longs à déployer – qui seront précieux lorsque le choc interviendra.**

2. La réussite des tentatives d'incorporer le changement climatique dans le calcul économique

On a vu qu'il était **essentiel d'incorporer le changement climatique dans le calcul économique**. Cela passe par des politiques nationales, mais aussi par une action internationale.

a) Les politiques nationales

En fonction des domaines d'application et de la vigueur des politiques menées à l'échelon national, l'introduction des filières de substitution aux énergies fossiles sera ou non accélérée.

D'où l'importance, dans chaque pays, du triptyque : encouragement à la recherche et au développement, incitations fiscales, édicition de normes.

Mais ces politiques ne peuvent être conçues que comme une contribution à une réponse planétaire à un problème prioritaire.

b) L'action internationale

(1) La poursuite du cycle de Kyoto

En eux-mêmes, les objectifs de Kyoto sont modestes puisqu'il ne s'agit que de réduire les émissions de CO₂ d'ici 2012 de 5 % par rapport à ce qu'elles étaient en 1990.

On sait également que le principal pays émetteur de gaz à effet de serre a signé, mais non ratifié, le protocole¹ et que les pays en voie de développement accéléré, comme la Chine et l'Inde, n'ont aucune obligation à ce titre.

On sait aussi que le transport aérien et le transport maritime qui ne représentent qu'un faible pourcentage des émissions de gaz à effet de serre (3,2 %) mais qui enregistrent des taux de croissance annuelle de 5 % et 6 % ne sont pas comptabilisés dans le protocole.

Ces lacunes, outre qu'elles encouragent la poursuite de la croissance mondiale des émissions, ont une conséquence perverse. Elles empêchent la constitution mondiale d'un instrument directeur de la lutte contre l'effet de serre : le marché des émissions de CO₂.

Or, on arrive dans la **zone de renégociation du protocole de Kyoto**, dont l'échéance est prévue en 2012, sans avoir résolu aucune des incertitudes qui affectent son efficacité. En particulier l'extension géographique de son application n'est pas acquise.

Elle est, d'une part, liée aux résultats des élections américaines de 2008.

D'autre part, **les premières propositions de Kyoto II qui pourraient concerner les pays émergents sont très timides**. Il ne s'agirait, dans le meilleur des cas, que de proposer à ces pays de limiter les émissions non pas par rapport à ce qu'elles étaient à un moment donné mais par rapport à ce

¹ *Même si certains États des Etats-Unis mettent en place des politiques appropriées.*

qu'elles seront compte tenu de leur croissance – dont on a vu par ailleurs qu'elle prend une pente proche de l'exponentiel.

L'échec ou l'insuffisance des résultats des futures négociations du cycle de Kyoto II freinera fortement l'introduction des filières alternatives à l'usage de carburants fossiles.

(2) Les règles de l'OMC

Cet aspect de l'évolution mondiale a déjà été abordé.

Quel que soit l'intérêt pour l'économie mondiale de la croissance du commerce international, il n'est plus possible d'en asseoir les règles de fonctionnement sur le seul système de diminution des barrières tarifaires et contingentaires.

Il serait souhaitable qu'une initiative soit prise à l'échelon européen permettant de réinsérer le réchauffement climatique dans les mécanismes de l'échange international.

Le prix des biens¹ ne doit plus être la seule variable d'ajustement du commerce international.

Une autre voie en ce sens pourrait être la création d'une **labellisation** portant des informations sur la politique de lutte contre l'effet de serre des pays exportateurs.

Il existe bien des labels « produit équitable », ou des labels européens portant sur la consommation énergétique d'équipements électroménagers ; **on pourrait très bien concevoir la mise en place d'une labellisation européenne dans le domaine de la lutte contre l'effet de serre.**

B. DES ÉLÉMENTS LIÉS À L'INFLEXION DES COMPORTEMENTS SOCIAUX

La transition énergétique correspond à un changement de monde. Mais ce changement dépendra fortement des comportements sociaux :

L'évolution des comportements sociaux dans un sens plus favorable au développement durable est une problématique complexe à la croisée de plusieurs disciplines des sciences humaines : la sociologie, la psychologie des comportements individuels et collectifs, l'économie. Elle **relève à la fois de la psychologie collective et de la mécanique des choix individuels.**

¹ Ou, à terme, celui des services.

1. La psychologie collective

Quels sont les facteurs qui gouvernent les modifications des comportements sociaux ?

Ils sont naturellement multiples mais, en première analyse, il faut **s'intéresser à l'apport des sciences humaines à deux sujets sociaux d'envergure : le rapport aux référents sociaux d'autorité et les mécanismes d'autocontrôles sociaux.**

Le rapport aux référents sociaux a de multiples aspects. Par exemple, l'évolution de l'attitude des citoyens à l'égard de la science a évolué. Contrairement à ce que l'on croit communément, une étude menée par la SOFRES en 2001 montre que parmi sept institutions (science, police, administration, entreprise, justice, assemblée nationale) **la science est celle qui recueille le plus de confiance : 88 % de nos concitoyens lui font confiance.**

Mais, dans le même temps, **nos concitoyens** – marqués par les crises sécuritaires des années quatre-vingts et quatre-vingt-dix – **ne souhaitent plus déléguer sans contrôle à l'autorité scientifique le fait de proposer des améliorations à leur vie quotidienne.**

De même, dans l'hypothèse où l'on voudrait mener des campagnes d'information en faveur du développement durable, on **ne pourra pas se dispenser d'examiner la façon dont les messages émanant des autorités sont reçus par la population.**

Le problème de l'autocontrôle social se pose également. Les bases de cet autocontrôle étaient larges dans les sociétés rurales où, de plus, le message éducatif était parfaitement reçu.

Aujourd'hui, dans des sociétés urbaines où les valeurs civiques ne sont pas clairement perçues, ces deux conditions ne sont pas remplies. Ce qui signifie, a contrario, qu'on ne peut tabler sur un autocontrôle social fort pour infléchir les comportements en un sens favorable à un développement plus mesuré¹.

En toute hypothèse, **ces voies de régulation des comportements sociaux sont indissociables de la mise en œuvre d'une politique de développement durable.**

¹ *Constat qui laisse, cependant, la porte ouverte à un autocontrôle indirect favorisé par la délivrance de labels « développement durable » qui se généralise actuellement et dont la demande sociale devrait être mieux cernée.*

2. Les choix individuels

Dans ce domaine deux sujets doivent être prioritairement évoqués : **la rationalité des choix et les mécanismes d'appropriation des usages.**

En principe, dans la théorie économique classique, les choix individuels sont rationnels et dictés par les niveaux de prix qui découlent des équilibres de l'offre et de la demande. Sur le point qui nous intéresse, les acteurs consommateurs auraient donc intérêt à adapter leur consommation d'énergie en fonction de leurs besoins réels.

Il se trouve que cette épure, qui demeure valable lorsqu'il s'agit d'investissements lourds (logement, voiture), est beaucoup moins pertinente lorsque sont en cause des actes pluriquotidiens portant sur des consommations de fluides et le plus souvent dispersés (laisser couler l'eau, fermer le robinet, allumer ou éteindre la lumière dans une pièce d'appartement, adapter le niveau de chauffage d'un logement, etc.....)

Un **autre champ d'étude** pour les sciences humaines pour consolider un développement plus durable est la façon dont les consommateurs s'approprient l'usage d'objets ou de services. De la nature et du degré de ces appropriations dépendra le succès d'une offre scientifique d'objets plus appropriés aux économies d'énergie.

*

* *

Ce domaine de l'inflexion des comportements sociaux en vue d'un développement plus durable est assez peu exploré par les sciences humaines. Il serait hautement souhaitable que les organismes de recherche intéressés entreprennent une action dans ce domaine.

C. DES ÉLÉMENTS INTRINSÈQUES À CHAQUE TECHNOLOGIE

L'introduction de filières alternatives à l'usage de combustibles fossiles **dépend étroitement de facteurs intrinsèques liés à la maturité technologique et aux paliers économiques d'introduction de chacune de ces filières.**

Ces deux éléments conditionnent naturellement les échéanciers de la mise en œuvre d'une transition énergétique et les politiques publiques de promotion de ces filières.

Une typologie élémentaire permet de distinguer :

1. Les filières qui approchent d'une maturité technologique et côtoient la rentabilité économique.

C'est le cas notamment :

- de l'hybridation dans le domaine automobile,
- des biocarburants dont certains commencent à être rentables à un pétrole à 80 \$ le baril et dont l'introduction à grande échelle sera facilitée par la disponibilité d'une technologie de seconde génération à l'horizon 2015 au plus tard,
- des diodes électroluminescentes dont la feuille de route prévoit des améliorations technologiques et une baisse massive des coûts à l'horizon 2012-2015,
- le solaire photovoltaïque dont les coûts pourraient diminuer d'un facteur trois d'ici 2015.

2. Les filières dont l'introduction économique est assurée, mais dont la maturité technologique est plus lointaine.

C'est le cas des réacteurs nucléaires de génération IV.

3. Les filières approchant de la maturité technologique, mais dont l'introduction dépend de conditions économiques extérieures

C'est le cas de la chaîne « captation-séquestration »¹ du charbon aux fins de produire soit de l'électricité, soit du carburant de synthèse ou de l'hydrogène dont la technologie progresse mais dont les bases scientifiques sont acquises.

L'introduction de cette filière qui permettrait d'utiliser les réserves de charbon excédant deux siècles achoppe à deux écueils économiques :

- la constitution d'un marché mondial des émissions de CO₂,

¹ Quoique la faisabilité sans risque de la séquestration ne soit pas encore acquise.

- et le coût unitaire et le gigantisme du déploiement qu'elle implique.

Réformer, en vue de la captation de CO₂, les 2 000 centrales thermiques fonctionnant au charbon dans le monde exigerait, dans chaque cas, des investissements de l'ordre de plusieurs centaines de millions d'euros.

Coupler ces installations avec des installations de « cracking » pour fabriquer du carburant de synthèse aboutirait à ajouter, à chaque fois, un coût supplémentaire du même ordre.

C'est aussi le cas de la voiture électrique, dont les possibilités d'extension sont liées à de fortes améliorations dans le domaine du stockage de l'électricité et pour laquelle le déploiement d'un réseau de distribution n'a pas encore été envisagé.

4. Les filières qui ne sont mûres ni technologiquement ni économiquement

C'est le cas de la filière hydrogène dont la production massive et l'utilisation foraine sous forme de pile à combustible exigent des ruptures technologiques et supposent des coûts de déploiement de réseaux de distribution très importants.

III. UNE CHANCE ÉCONOMIQUE À SAISIR

Changer ou même infléchir fortement une architecture énergétique, c'est changer de monde économique.

Lorsque l'éclairage public à l'électricité a été introduit à New York en 1872, face à la filière dominante depuis un demi-siècle de l'éclairage au gaz, peu de gens pouvaient imaginer les conséquences économiques de ce geste. Non plus que les premiers acheteurs d'automobile ou les premiers « fous volants » ne pouvaient se représenter ce que les technologies balbutiantes qu'ils utilisaient allaient transformer l'économie mondiale.

La transition énergétique est une obligation mais c'est également une chance à saisir.

Et ce que nous imposent la raréfaction des ressources fossiles et la nécessité de lutter contre le changement climatique représente aussi une occasion de nous associer à ce que sera l'économie du 21^e siècle.

Encourager et promouvoir l'introduction de filières énergétiques de substitution à nos usages actuels est, dans un premier temps, très coûteux.

Par exemple, l'action menée par l'Allemagne depuis plus d'une décennie dans le domaine de l'isolation des bâtiments, de l'éolien, du photovoltaïque et des biocarburants correspond à une charge brute de l'ordre de cinq milliards d'euros annuels.

Mais, pour coûteuse qu'elle soit, cette action a à la fois créé 150 000 emplois permanents et surtout un réseau d'entreprises nouvelles qui, à chaque fois, figurent parmi les leaders mondiaux de secteurs d'avenir.

Au demeurant, les simulations effectuées par la MIES dans son rapport précité sur la réduction des émissions de CO₂ par un facteur 4 montrent qu'une marge de financement importante existe.

Ainsi, par rapport à la poursuite de la tendance actuelle d'ici 2050 qui impliquerait un quasi-doublement de la dépense énergétique française du fait de la poursuite de la croissance (de 74,8 milliards d'euros à 144,4 milliards d'euros), auquel il faudrait ajouter un surcoût dû au choc pétrolier de 239 milliards d'euros, la réussite de la politique de réduction d'un facteur 4 laisserait une marge de financement disponible de 187 milliards d'euros.

A terme, le coût de la transition énergétique s'autofinance très largement.

*

* *

Au terme de cette analyse des buts et des conditions de faisabilité de la transition énergétique, **on peut avancer les observations suivantes :**

1. **Le défi de la transition énergétique est gigantesque** puisqu'il s'agit de réduire fortement, en l'espace d'une génération, les 88 % d'énergies fossiles émettrices de CO₂ que la planète utilise.
2. **Dans tous les domaines de cette utilisation de sources d'énergies primaires fossiles** (production d'électricité, transports, résidentiel-tertiaire), **la science et la technologie sont à même d'apporter des réponses.**
3. Mais ces propositions de substitution à l'utilisation d'énergies fossiles sont à des stades de maturation technologiques et économiques différents.
4. **Il est donc nécessaire d'encourager l'ensemble de ces filières alternatives**, qu'elles soient immédiatement applicables, en voie accélérée d'application ou qu'elles représentent les solutions de l'après 2030.
5. En toute hypothèse, la **transition énergétique** est une obligation mais c'est aussi **une chance à saisir**. Car nous allons entrer, d'ici 2020-2030, dans un monde totalement nouveau avec des métiers et des secteurs économiques nouveaux dont il faut, dès maintenant, favoriser l'émergence.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le modèle énergétique mondial repose sur deux assises très fragiles.

Il est la cause d'une **accélération du changement climatique** dont nous supporterons d'ici moins d'une génération des effets physiques qui ne sont pas exactement perçus et des conséquences économiques sous-estimées (**actuellement, le coût du changement climatique est de l'ordre de 1 % du PIB mondial, dans vingt ans il pourrait approcher 3 %**).

Et il repose sur la **surutilisation de combustibles fossiles** dont les réserves ne supporteront pas longtemps l'accélération de la demande mondiale que portent à la fois la démographie, les règles de la mondialisation et l'essor économique de pays émergents qui représentent plus du tiers de l'humanité et consommeront largement plus que les pays industrialisés dans une génération.

La confrontation de cette demande mondiale de pétrole et de gaz en pleine expansion et d'une capacité d'offre qui s'altère **nous promet d'ici moins de 20 ans un choc pétrolier de grande ampleur, portant le baril à 150 \$ ou plus**.

Ce choc correspondra à **une ponction de 2 % de PIB sur les économies des pays consommateurs** qui devront, en outre, supporter les coûts croissants du changement climatique, **l'ensemble des deux provoquant une récession mondiale**.

D'où la **possibilité de réalisation de deux scénarios alternatifs** :

• **La poursuite de la tendance actuelle qui représente la perspective du pire avec le double risque** :

- de montée des tensions internationales,
- et de forte rétractation de l'économie mondiale.

- **La mise en place rapide de la transition énergétique**

Cette transition :

- **suppose de préparer, dès maintenant, le monde d’après-demain en surmontant la triple inertie** du renouvellement des équipements, du déploiement des filières technologiques nouvelles et de l’adaptation des mentalités,
- mais **implique aussi un volontarisme politique, national et international**. Le manque de solidarité entre les pays qui luttent contre le changement climatique et ceux qui veulent en ignorer la menace deviendra un facteur de tension politique majeur et conduira à un éclatement des structures internationales.

Cette distorsion de concurrence deviendra insupportable même si les pays qui prendront de l’avance dans la lutte contre l’effet de serre seront à terme gagnants dans le secteur clé de l’innovation technologique.

L’apport de la science et de la technologie est en effet un atout précieux pour la réussite de la transition énergétique

Le défi est de grande ampleur : il faut se préparer à substituer des sources d’énergies non ou faiblement émettrices de gaz à effet de serre aux 88 % de combustibles fossiles que la planète utilise chaque année pour son développement. Défi économique, défi technique, défi culturel !

Dans trois domaines centraux, la production d’électricité (40 % des émissions de CO₂), le transport (24 % des émissions de CO₂) et le résidentiel-tertiaire (17 % des émissions de CO₂), les réponses scientifiques existent mais à des stades différents de maturité économique et technologique.

Il faut répondre d’urgence à ces défis et, outre l’adaptation à des modes de vie communs, il est nécessaire d’activer le déploiement de l’ensemble de ces filières alternatives aux combustibles fossiles. C’est **une chance à saisir, car c’est préparer notre économie aux emplois de demain**.

QUATRIÈME PARTIE :
DIX PROPOSITIONS POUR RÉUSSIR
LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

A l'horizon de 2030, la poursuite de la tendance actuelle aboutira à une situation mondiale caractérisée par des coûts croissants dus au changement climatique et des prix du pétrole élevés.

A l'échelon national comme à celui de la planète, ce mouvement aboutira à renforcer les inégalités, à créer des tensions inquiétantes et à rendre les investissements nécessaires pour la transition énergétique plus difficiles à financer.

Face à ces données, il y a deux comportements : subir ou agir.

Nous proposons d'agir tant qu'il existe encore des financements mondiaux disponibles.

Il faut, dès maintenant, poser les bases d'une transition énergétique permettant la poursuite d'un développement mesuré de l'économie mondiale tout en limitant l'usage immodéré de combustibles fossiles émetteurs de gaz à effet de serre.

C'est ce que nous impose la prudence pour limiter les catastrophes liées au changement climatique.

Mais c'est aussi ce que nous commande notre avenir économique. Car infléchir fortement notre architecture énergétique, c'est changer de monde, créer de nouveaux secteurs de développement et préparer les emplois de demain.

Assumer et construire une stratégie de transition énergétique, telle est notre proposition. Elle est offensive. La crise actuelle peut être une opportunité de rebond et, pour les responsables politiques, l'occasion de retrouver le volontarisme. Une nouvelle frontière est devant nous.

Cette volonté est traduite dans les dix propositions qui suivent.

I. MIEUX CONNAÎTRE LES EFFETS RÉELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Les progrès scientifiques et technologiques enregistrés depuis une vingtaine d'années dans les domaines de l'observation satellitaire, de la numérisation des données et de leur modélisation ont considérablement affiné notre connaissance des causes et des effets du changement climatique.

Mais compte tenu de l'accélération du phénomène et de l'amplification annoncée de ses effets, il faut améliorer encore la connaissance des phénomènes et **solliciter rapidement les marges importantes de progrès qui existent dans ce domaine.**

Ceci dans trois directions : la poursuite des programmes satellitaires, la création d'une plate-forme mondiale de calcul et l'intensification des études sur les coûts du changement climatique.

A. L'INTENSIFICATION DES PROGRAMMES SATELLITAIRES D'OBSERVATION

L'observation spatiale est un secteur essentiel.

De très nombreux programmes y concourent (océanographie opérationnelle, observation de la qualité de l'air, observation des glaces, météorologie opérationnelle).

Le renforcement de ces programmes est essentiel pour affiner notre connaissance du changement climatique.

Or, dans certains domaines comme celui de l'océanographie opérationnelle (altimétrie, couleur de l'eau), la poursuite de ces observations satellitaires ne sera plus assurée après 2009.

Il est nécessaire de continuer à assurer ces missions et, compte tenu des délais de mise en œuvre de ces programmes, de prendre rapidement des décisions sur ce point.

B. LA CRÉATION D'UNE PLATE-FORME MONDIALE DE CALCUL

La modélisation, la confrontation des modélisations passées avec les observations actuelles sont parmi les principaux leviers des travaux du GIEC.

Or l'on aborde une phase de ces travaux où, après avoir clairement établi l'origine anthropique du changement climatique, la communauté scientifique mondiale doit à la fois préciser les fourchettes d'évolution du

changement climatique, ses échéances et, plus finement, ses conséquences locales.

Cela exige la mise en ligne mondiale d'une puissance de calcul plus forte et moins dispersée que celles qui sont actuellement utilisées. Il appartient donc aux pays membres du GIEC de mettre en place une plate-forme mondiale unifiée de calcul à la disposition de la communauté scientifique.

La communauté scientifique et politique mondiale a su se mobiliser dans de grands et coûteux programmes (CERN, ITER, etc.). Les enjeux climatiques sont tels qu'ils justifieraient également la création de centres de calcul de très haut niveau, liés en une plate-forme pilotée par les scientifiques.

C. RENFORCER L'ANALYSE DU COÛT EFFECTIF ET PRÉVISIBLE DES DÉGÂTS LIÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Le changement climatique prélève des sommes croissantes sur le PIB mondial.

Le volume des études économiques et comptables des dégâts liés est dérisoire. Ce facteur central de l'économie planétaire ne semble pas intéresser les économistes, à l'exception de ceux des compagnies d'assurance.

Les grandes compagnies de réassurance mènent des études sur ce point. On a également cité l'étude de l'institut allemand (DIW) qui, sur la seule base d'une augmentation de 1°C de la température¹, chiffre à 2 000 milliards de \$ le coût annuel de ce changement aux Etats-Unis en 2050 – ce qui correspondrait à une fraction de 6 % du PIB mondial actuel. Ils n'ont pas voulu ou pas osé examiner les effets au niveau plus élevé et, maintenant, plus probable de la fourchette des prévisions.

Il serait souhaitable que soit formée auprès du GIEC une capacité internationale de chiffrage de ces coûts en fonction des hypothèses qui seraient peu à peu affinées par cette instance.

Il est à espérer que nos universités et grandes écoles mettent des équipes pluridisciplinaires et des centaines de thèses en chantier sur cette problématique. **Pourquoi inscrire un principe de précaution dans la Constitution concernant des éventualités incertaines si l'on n'est pas capable d'imaginer des scénarios de prévention contre des menaces certaines ?**

¹ Base modeste compte tenu de l'accélération actuelle du réchauffement.

II. RÉINSÉRER LE CHANGEMENT CLIMATIQUE DANS LES MÉCANISMES DE L'ÉCONOMIE MONDIALE

Les principaux ressorts de l'économie mondiale (concurrence sur les prix, allocation de facteurs de production indépendamment du coût des émissions de gaz à effet de serre dans leur transport, flux tendus, préférences pour les résultats financiers de court terme) **concourent à amplifier le changement climatique.**

La réponse proposée par le mécanisme mis en place par le protocole de Kyoto (action volontariste des États de réduction des émissions de CO₂, constitution collatérale de marchés des émissions de CO₂) est appropriée en ce qu'elle vise à réinsérer dans le calcul économique mondial la déséconomie externe menaçante du réchauffement climatique.

Mais l'on sait que les obligations de Kyoto – au demeurant timides au regard de l'accélération des émissions mondiales – ne concernent que la moitié des émissions.

Et on peut concevoir des doutes sérieux concernant la réussite **du cycle de Kyoto** :

- quant au **comportement très préoccupant des Etats-Unis** vis-à-vis de la renégociation – et de la ratification – d'un cycle Kyoto II,

- et **quant au statut des pays dits émergents**, et notamment la Chine et l'Inde, dont les caractéristiques économiques (très forte expansion, architecture énergétique reposant sur le charbon¹) **qui n'ont actuellement aucune obligation et n'auront, au mieux, que de faibles obligations à l'issue du cycle Kyoto II.** On doit, d'ailleurs, relever qu'une erreur stratégique a été commise en écartant ces pays à forte croissance des obligations figurant au premier protocole. Car le déploiement gigantesque d'équipements auquel donne lieu, par exemple, la croissance chinoise, aurait pu être l'occasion d'une réorientation de la croissance de cette économie vers un développement plus durable.

La perspective d'une seule insuffisance de résultat du cycle de Kyoto conduit à insister sur le fait qu'il ne sera plus possible d'admettre des distorsions de concurrence qui deviendront de plus en plus insupportables entre les pays qui luttent contre l'effet de serre et ceux qui aggravent le changement climatique.

Il est donc indispensable d'activer l'extension du protocole de Kyoto par un mécanisme incitateur.

Les pays ayant des obligations de diminution des émissions au terme du protocole de Kyoto I pourraient édicter **une taxe carbone compatible avec**

1 Rappelons que la Chine tire plus des deux tiers de son énergie du charbon et qu'elle envisage, en 2020, d'en tirer encore près de 60 %.

les règles de l'OMC. Celle-ci serait applicable au plan national et aux produits importés sur la base de certificats énergétiques correspondant aux technologies de fabrication les plus économes en gaz à effet de serre. Cette taxe serait remboursée, comme la TVA, à l'exportation.

Mais, pour être conforme aux règles de l'OMC, cette taxe ne concernerait pas les émissions imputables à la production d'énergie qui est la plus importante source d'émission de CO₂. **Elle serait donc limitée.**

Le problème de la **mutation des règles qui gouvernent le commerce international se posera donc rapidement.**

On ne pourra plus longtemps accepter qu'un des mécanismes directeurs de l'économie mondiale fonctionne sur des schémas conceptuels hérités du 19e siècle alors que le changement climatique et la raréfaction des carburants fossiles changent fondamentalement la donne économique mondiale.

C'est là un nouveau chantier qui doit être ouvert au sein de l'OMC, à l'initiative de la France, avec le soutien actif de l'Europe.

III. FAIRE DE L'EUROPE UN ACTEUR CONCRET DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Le secteur de l'énergie n'entre pas directement dans les compétences de la Commission européenne.

Mais l'attitude de la Commission vis-à-vis du développement durable est ambiguë.

D'une part, certaines de ses Directions générales (recherche, transports) mènent des actions résolues contre les causes du changement climatique.

D'autre part, une autre de ses Directions générales, inspirée par la doctrine de la dérégulation, poursuit activement une politique de mise en concurrence avec l'objectif affiché de faire baisser les prix de l'énergie électrique dans l'Union.

Cette politique de baisse des prix n'a pas d'effets réels jusqu'à présent : la dérégulation s'est, au contraire, traduite partout par une hausse très significative de l'électricité.

Mais, à terme, cette politique de baisse des prix de l'énergie sera doublement néfaste :

- elle portera indirectement atteinte à la capacité d'investissement des grands opérateurs qu'il sera nécessaire de mobiliser pour mettre en place des filières de substitution aux énergies fossiles,
- et elle contredira toute politique d'économie d'énergie électrique, notamment dans des pays qui ont une architecture énergétique très émettrice de CO₂.

En matière d'énergie, la Commission doit promouvoir les traités européens d'une façon qui ne contredit pas les politiques qu'elle mène par ailleurs. L'Europe doit mettre ses actions en cohérence.

Au-delà, l'Union européenne doit devenir un acteur beaucoup plus actif de la transition énergétique. C'est son intérêt industriel car les États qui auront préparé cette transition se trouveront en position de force quand les difficultés nées du changement climatique et du choc pétrolier se feront jour.

Ceci dans deux domaines : la labellisation et la création d'infrastructures européennes de transport.

A. LA LABELLISATION CARBONE

Les propositions visant à instaurer une taxe carbone provisoire pour activer les négociations du cycle de Kyoto seront longues à mettre en œuvre et dépendent d'une volonté politique commune, principalement à l'Union européenne et au Japon qui n'est pas acquise.

C'est pourquoi il serait souhaitable, dans un premier temps, que l'Union européenne mette en place **un label « carbone »**, à l'instar du label qui existe déjà en matière de consommation de produits électroménagers. **Ce label pourrait être assis sur le degré de respect par les pays exportateurs des dispositions du protocole de Kyoto qui s'imposent aux pays signataires.**

B. LA CRÉATION D'INFRASTRUCTURES DE TRANSPORT EUROPÉENNES LIÉES AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Ces investissements sont longs à déployer et très coûteux mais riches de créations d'emplois durables.

Il serait donc utile que l'Union européenne **joue un rôle d'impulsion dans ce domaine. Deux secteurs pourraient principalement être concernés : le ferroutage et l'installation d'autoroutes de l'hydrogène, et leur financement pourrait bénéficier d'une fiscalité spécifique.**

1. La création d'une fiscalité européenne dédiée au développement durable

La participation de l'Union européenne aux investissements liés à une stratégie de développement durable pourrait être assurée par trois types de taxes européennes nouvelles :

- **l'une sur le transport maritime à fort tonnage,**
- **l'autre sur le kérosène utilisé dans l'aviation civile**
- **par ailleurs, un fonds spécial alimenté par une taxe sur les produits charbonniers, pétroliers et gazeux devrait permettre de systématiser tous les procédés permettant la capture et le stockage du gaz carbonique.** Les expérimentations d'oxycombustion devraient en particulier être largement financées par le fonds de façon à créer une industrie compétitive.

2. Le ferroutage

Actuellement, les projets de ferroutage ne visent que le franchissement des cols alpins, comme celui mis en œuvre entre la France et l'Italie.

Or, en matière de fret routier à long rayon d'action, le ferroutage constitue une des solutions limitant la croissance de celles des émissions de gaz à effet de serre qui sont les plus difficiles à restreindre.

L'Europe constitue un terrain d'élection dans ce domaine. **En 1999, aux Etats-Unis, 38 % des transports s'effectuaient par le rail, alors qu'en Europe ce pourcentage était inférieur à 10 %¹.**

On sait que le croisement des tarifs entre le transport par route et le transport par chemin de fer se situe entre 500 et 600 km. Mais il s'agit d'une donnée ancienne reposant sur un prix de pétrole à 30 \$ le baril qui ne prend pas en compte l'avantage économique que présenteraient des infrastructures de ferroutage à l'échelon du continent européen.

Au fur et à mesure que les prix du pétrole augmenteront, le point d'équilibre entre les deux modes de transport sera plus bas.

Il est donc essentiel que l'Union européenne prenne l'initiative d'un programme d'ampleur dans ce domaine, en créant deux axes de ferroutage à grande distance, sur le trafic Est-Ouest et le trafic Nord-Sud. La France doit à cet égard prendre une initiative forte.

3. La filière hydrogène

Dans l'avenir, s'agissant de la production d'hydrogène, il semble que l'électrolyse soit très coûteuse mais permettrait une forme de stockage d'énergie éolienne dont la disponibilité est aléatoire. Le réacteur à haute température franco-allemand paraît en panne et les concentrateurs type Odeillo de chaleur solaire inopérants. L'utilisation de la biotechnologie reste au niveau des laboratoires spécialisés. Il faudra donc attendre les réacteurs nucléaires de génération IV.

Les conditions de déploiement entier d'une filière hydrogène appliquée au transport ne seront donc pas mûres avant une génération.

Mais il peut être utile de préparer ce déploiement en équipant, à titre expérimental et très progressivement, certaines des régions européennes d'installations de distribution d'hydrogène, que ce soit en milieu urbain (par exemple, en France, la région parisienne ou la Côte d'Azur), ou sur des axes autoroutiers européens.

¹ Cette différence s'explique partiellement, mais pas totalement, par un plus fort recours aux transports maritimes et fluviaux dans l'Union européenne.

Cette action devrait être couplée avec le lancement d'une politique de recherche européenne axée sur la transposition de cette filière aux frets routiers à long rayon d'action. **Cette politique prendrait place dans la suite de celle que mène l'Union en matière de développement expérimental de flottes captives d'autobus à hydrogène.**

IV. FAIRE DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE UNE PRIORITÉ NATIONALE

La mesure des enjeux de la transition énergétique a-t-elle été réellement prise ?

Au regard d'un chantier qui est de l'ampleur de la reconstruction que la France a dû mener après-guerre, on peut en douter.

Le développement durable devient certes, peu à peu, une préoccupation nationale dans les discours mais la transition énergétique qu'il implique n'est pas encore perçue comme une priorité nationale urgente.

Trois séries de propositions doivent y contribuer : la structuration de l'action publique, la fixation d'objectifs consensuels dans la durée et l'information continue et concrète des citoyens.

Au cours des dernières années, les gouvernements successifs et les médias sont devenus plus sensibles à la notion de développement durable. Depuis un an on perçoit même, dans ces deux secteurs, une accélération de la prise de conscience des enjeux et l'on observe une promotion de l'action (par exemple en matière de prix de rachat de l'énergie produite de façon renouvelable ou de l'encouragement du développement de l'usage des biocarburants).

Mais dans le même temps, l'impression prévaut que l'action de l'État est insuffisamment coordonnée.

Les cloisonnements verticaux de chaque ministère et de leurs organismes de recherche respectifs, la multiplication des agences et des organismes de conseil **masquent la cohérence d'ensemble de l'action publique, et occultent les structures qui portent cette action dans chaque secteur de la transition énergétique.**

Or, dans un domaine où l'action publique doit être forte et continue, sa lisibilité est essentielle.

Mais, dans le même temps, la prudence commande de ne pas surajouter, suivant un travers très français, des structures nouvelles permanentes à celles qui existent.

Aussi pourrait-il être proposé :

1. De créer un Haut Conseil de la transition énergétique

Ce Haut Conseil, placé sous l'autorité directe du Premier ministre¹, regrouperait **les acteurs publics et privés** de la transition énergétique et présenterait tous les ans, au Parlement et à la nation, un bilan de l'action menée et des propositions d'actualisation de la politique menée dans ce domaine, avec examen et vote par le Parlement.

2. De créer un Commissaire à la transition énergétique

Ce Commissaire serait doté de pouvoirs garantis par un Comité interministériel ad hoc, chargé de faire appliquer les décisions motivées du Haut-Conseil.

3. D'instituer une délégation parlementaire à la transition énergétique

Cette proposition, qui reprend² celle de la MIES menée à l'Assemblée nationale permettrait, d'une part, de mieux informer le Parlement et, d'autre part, d'instaurer les conditions d'un dialogue institutionnel et politique sur ce qui doit devenir une priorité nationale.

Ainsi serait reconnue et confortée la mission de contrôle du Parlement dans un secteur déterminant pour l'avenir de la nation.

4. De nommer par décision prise entre le Commissaire et le ou les Ministres compétents un responsable de projet pour chaque filière de substitution

Un des défauts de l'organisation administrative de notre pays est la verticalité et la **prévalence d'une culture d'administration par rapport à une culture de projet**. La LOLF tend à renforcer les structures horizontales et dans chaque filière d'énergie alternative, les responsabilités – recherche, normalisation, incitation – dépendent d'autorités multiples. Les projets de la transition énergétique seront définis dans la LOLF.

Il est nécessaire de coordonner ces autorités afin de faire avancer le développement de chacune de ces filières (biocarburants, solaire, photovoltaïque, hydrogène, rénovation des bâtiments, éolien, développement du nucléaire de génération IV, véhicules électriques, captation-séquestration du CO₂, usages domotiques et aménagement du territoire grâce aux TIC, etc.).

¹ La Chine, qui a des problèmes de dispersion et de superposition de structures administratives d'une nature assez comparable aux nôtres, a adopté cette solution.

² A la réserve près que le terme « transition énergétique », plus précis et de nature à correspondre plus exactement à des objectifs identifiables, semble préférable à celui de développement durable.

Les responsables de projet pour chaque filière rendront compte au Commissaire à la transition énergétique de l'état d'avancement de leur déploiement.

A. AFFICHER LES ÉCHÉANCES D'UN PLAN DE TRANSITION ÉNERGÉTIQUE

Si elle doit être initiée aussi rapidement que possible, et sur les rails à l'horizon 2020, la réussite de la transition énergétique va imposer des rythmes longs.

Il s'agit de décider aujourd'hui pour après-demain.

Le temps nécessaire au développement de nouvelles filières, à la mise en place de l'offre publique d'infrastructures nouvelles de transport ou la rénovation d'un parc de bâtiments de services ou résidentiel, ou l'introduction de nouvelles technologies de l'automobile, évolue entre une quinzaine d'années et un demi-siècle (dans le cas du bâtiment).

Ces délais de développement excèdent à la fois les horizons de perception des citoyens et les rythmes, maintenant quinquennaux, de notre cycle politique.

Il est donc nécessaire que les pouvoirs publics fixent des objectifs de transition énergétique, les déclinent par domaine d'application, donnant une lisibilité à long terme à leur action. Et tout aussi nécessaire d'activer la recherche d'un consensus politique et économique aussi large que possible afin d'éviter que des moyens mis à l'appui de ces objectifs soient remis en cause lors de discussions budgétaires annuelles.

Cette réintroduction de la durée dans le choix politique pourrait prendre la forme d'un **plan de transition énergétique fixant pour 2010, 2015, 2020, 2025 et 2030 les objectifs généraux à atteindre.**

Ceux-ci seraient en outre déclines dans les feuilles de route propres à chaque filière alternative (cf. *infra*).

L'application du dispositif serait examinée chaque année par le Parlement pour valider les résultats et engager des actions nouvelles.

B. « BALAYER », DANS LES DOMAINES DIRECTEURS DE LA TRANSITION ÉNERGÉTIQUE, LA LÉGISLATION QUE SONT L'URBANISME ET LES TRANSPORTS

L'ampleur de la politique exigée par les circonstances et la diversité des mesures à prendre dans des champs multiples conduisent naturellement à ouvrir un chantier législatif considérable.

Une loi programme ou une loi cadre s'impose. Elle ne suffira pas. C'est un balayage de l'ensemble du dispositif législatif lié à la nouvelle politique énergétique qu'il faut préparer. Deux lois fondamentales, en particulier, devront être radicalement revues en fonction de la transition énergétique :

- la SRU, qui regroupe les dispositions relatives à l'habitat et à l'urbanisme,
- la LOTI, qui organise les transports intérieurs.

C. INFORMER LES CITOYENS

On ne change pas de modèle économique sans y associer étroitement les acteurs de ce modèle.

Sur ce plan, il est à la fois nécessaire de mettre en place une action de sensibilisation générale et une action d'information concrète.

1. La sensibilisation générale

Cette sensibilisation doit d'abord s'effectuer dans le **milieu éducatif**.

Elle pourrait prendre la forme d'une demi-journée, ou deux, d'information annuelle donnée à tous les stades de la vie scolaire : école, collège, lycée. Cela a été démarré avec succès mais doit prendre une forme plus complète.

Mais elle doit également s'adresser aux adultes.

L'information donnée par les médias sur le développement durable et le changement climatique est de bonne qualité mais sans réelle continuité.

Les campagnes grand public développées par l'État sur de grands sujets d'intérêt national (alcool, tabac, sécurité routière) peuvent avoir une efficacité provisoire mais elles présentent aussi l'inconvénient de l'intermittence.

En raison des enjeux de la transition énergétique, **il sera nécessaire de développer des campagnes d'information continues sur les grands médias et donc d'y affecter des moyens appropriés.** Par ailleurs, le CSA devrait impérativement veiller à ce que toute chaîne – publique ou privée, prête attention à ces problèmes.

Cette action devra faire l'objet d'une mission spécifique nouvelle exigée du secteur public de l'audiovisuel ainsi que des attributaires de concessions.

La chaîne d'accès au savoir, France 5, doit tout particulièrement être mobilisée. Le contrat de programme entre l'État et France Télévisions doit être revu dans l'esprit de la priorité nationale de la transition énergétique.

2. L'information concrète

Le ressaut récent du prix du pétrole a permis de constater **le hiatus qui existait entre une demande nouvelle de moyens de chauffage moins coûteux et l'insuffisance d'une information concrète sur les possibilités d'installation.**

L'ADEME qui prend en charge cette action a des moyens ridiculement faibles et insuffisants (de l'ordre de 3 millions d'euros pour l'ensemble de son action d'information).

Il faudrait, sur ce point, **renforcer fortement les moyens de cette agence** en s'inspirant de l'exemple allemand.

La DENA (Deutsche Energie Agentur) développe des moyens d'action classiques (Internet, relais de presse) mais :

- gère un réseau de conseils à 7 200 installateurs et d'équipements,
- organise des séminaires thématiques (comme par exemple des sessions sur l'éclairage efficace dans des grands magasins d'ameublement),
- et propose 800 centres d'information et de conseils aux consommateurs.

Enfin, une autre façon de diffuser cette information concrète pourrait être la mise à disposition auprès des communes de dossiers indiquant où trouver cette information. Ces documents pourraient être remis à l'occasion du retrait des dossiers de permis de construire.

Bien entendu cette information concrète, actualisée en permanence, doit être diffusée par les moyens numériques actuels et futurs qui jouent un rôle croissant dans notre société. Ils seront largement relayés par une rubrique quotidienne aux heures de grande écoute de France 5.

V. ENCOURAGER LE DÉVELOPPEMENT DES FILIERES ALTERNATIVES À LA CONSOMMATION D'HYDROCARBURES FOSSILES

Réussir la transition énergétique est une nécessité mais c'est aussi une chance de préparer notre économie au monde de demain. **En encourageant sur une décennie le développement des énergies renouvelables, l'Allemagne a ainsi créé 150 000 emplois et constitué des sociétés qui sont parmi les leaders mondiaux de leur secteur.** Ainsi, elle exporte 60 % de sa production d'éoliennes.

Mais les propositions scientifiques et technologiques qui nous permettront d'asseoir la transition énergétique sont, nous l'avons vu, **à des stades différents d'introduction sur le marché.**

L'ensemble de ces filières doit encore faire l'objet d'encouragements économiques – prix de rachat du courant, détaxation fiscale, crédit d'impôt ou d'incitations normatives. Mais la plupart d'entre elles (biocarburants, solaire photovoltaïque, hybridation automobile, nouveaux matériaux pour la construction, diodes électroluminescentes) déboucheront massivement dans notre économie d'ici 2015.

Il est donc nécessaire d'utiliser la dizaine d'années qui nous sépare de cette échéance pour asseoir le développement industriel de ces filières en France et ne pas suivre les grands pays en la matière.

Assurer cette synchronisation pour développer aujourd'hui les biens et les services de demain sera essentiel.

Pour chacune de ces filières, il convient :

- de **nommer un responsable de projet relevant du secteur public ou privé**, et rendant compte de son action au Commissaire à la transition énergétique,
- **d'activer la recherche-développement dans certains secteurs clés** (batteries, capture du CO₂, systèmes énergétiques élaborés, etc.).
- de **clarifier les perspectives par la mise au point de feuilles de route décrivant les mesures incitatives directes ou normatives la concernant**, ces feuilles de route établiront **des échéanciers d'objectifs pour 2010, 2015, 2020, 2025 et 2030**,
- **de développer massivement les expérimentations,**

- **et d’assurer un lien étroit de la chaîne de recherche-développement – si possible en liaison avec les pôles de compétitivité.** Les projets de ces pôles devraient comporter un volet contribution à la transition énergétique et les agences de financement (ANVAR, ANR, DGE, AII, EUREKA, etc.) tenir compte de la priorité de la transition énergétique.

Les actions menées par l’AII sur l’hybridation automobile ou le centre de recherche sur l’énergie solaire implanté à Chambéry sont des exemples qui devront être multipliés.

VI. REMETTRE EN ORDRE LE DISPOSITIF FISCAL POUR ASSURER DES FINANCEMENTS COMPLÉMENTAIRES

A terme, la transition énergétique s'autofinancera globalement largement. Dans l'avenir, toute structure, entreprise, territoire, collectivité qui aura su anticiper bénéficiera d'un avantage financier substantiel à l'heure de l'explosion du coût de l'énergie. **Mais, au départ, il faut trouver des financements pour amorcer cette transition, tant en matière de recherche-développement que de déploiement de filières de substitution.**

Des aménagements fiscaux directs (détaxation, crédit d'impôt) existent déjà :

- détaxation des biocarburants (255 millions d'euros en 2005, 1 200 millions d'euros en 2010, selon le rapport précité de l'Inspection générale des finances et du Conseil général des mines),
- crédit d'impôt pour l'installation d'équipements fournissant les économies d'énergie dans l'habitat (420 millions d'euros prévus en 2006),
- crédit d'impôt pour l'installation d'équipements de cogénération(50 millions d'euros).

De plus, comme le note le rapport du Conseil des impôts, « Fiscalité et environnement », il existe de nombreuses détaxations dont l'efficacité semble être douteuse puisque le ministère des finances n'est pas capable d'en identifier le coût pour le budget de l'État.

On doit ajouter que le régime de la TIPP se caractérise par de nombreuses exonérations, quelquefois justifiées, quelquefois non :

- mesures de taxation du gazole par rapport à l'essence qui correspond à peu près à ses moindres émissions de gaz à effet de serre (de l'ordre de 20 %),
- exonération de 80 % de la TVA s'appliquant au prix du gazole pour les véhicules d'entreprises fonctionnant au diesel,
- taxation du fuel utilisé pour le chauffage domestique sept fois inférieure à celle du gazole,
- taxation du fuel lourd utilisé par l'industrie et la production d'électricité 20 fois inférieure à celle du gazole,
- remboursement d'une partie de la TIPP aux transporteurs routiers,

- régimes spéciaux pour des branches spécifiques : agriculture, pêche, etc.

Au total, ce régime fiscal se caractérise plus par une volonté d'exonérer certaines professions sensibles que par la nécessité d'établir une fiscalité correspondant aux enjeux de la transition énergétique.

Comment infléchir cette structure fiscale de l'usage des hydrocarbures afin d'encourager progressivement l'utilisation d'énergies alternatives au pétrole ?

S'il est nécessaire d'accroître fortement les crédits et les incitations au déploiement de filières alternatives, doit-on le faire à périmètre fiscal constant, les accroissements de taxes compensant la montée des aides ou accroître les aides sans pression fiscale compensatoire ?

Il serait préférable de « préfinancer » fiscalement des activités dont on peut attendre un retour de recettes assez rapide, mais l'état actuel des finances publiques ne laisse que des marges d'action assez faibles sur ce point.

Par prudence, on raisonnera donc à périmètre constant, la fiscalisation des émissions de CO2 étant appelée à financer la recherche et le déploiement des filières de substitution.

Et dans cette approche, nous retenons deux possibilités :

- l'augmentation de la TIPP,
- l'augmentation des impôts sur l'achat ou l'utilisation de véhicules.

• L'augmentation progressive de la TIPP est, en théorie, la solution idéale puisqu'elle décourage directement l'usage des fluides qui sont les principaux responsables des émissions de gaz à effet de serre.

Elle préfigure, de plus, le choc pétrolier qui nous attend et inciterait les acteurs économiques à s'y préparer. Par exemple, une augmentation de la TIPP de 20 % sur dix ans, soit 2 % par an, dégagerait – sur l'année 2015 – **une ressource supplémentaire de 5 milliards d'euros qui pourrait être utilisée pour encourager les filières de substitution.**

Malheureusement, cette solution a un inconvénient.

Cette augmentation, même progressive, pourrait se conjuguer avec une augmentation du prix du pétrole.

Bien qu'à notre avis nécessaire, elle deviendrait rapidement insupportable socialement – sauf compensation – et nécessite un courage politique qui suppose une large information préalable.

Le doublement récent du prix du pétrole a montré, aussi bien en matière d'utilisation de véhicules automobiles que de chauffage domestique, que pour certaines couches sociales on atteindrait les limites de ce qui pouvait être toléré.

On ne peut envisager, dans une société comme la nôtre, qu'une politique de lutte contre le réchauffement de la planète se traduise par une aggravation des inégalités sociales, déjà trop grandes.

Aussi, si cette solution devait être proposée, elle devrait être mise en œuvre à un rythme moins rapide (1 % par an) et ne pas s'appliquer au fioul domestique qui demeure un combustible socialement très sensible.

En 2015, cette augmentation modérée pourrait rapporter **2 milliards d'euros**.

• Une autre solution, qui n'est pas exclusive de la première, est de taxer l'achat des véhicules automobiles.

La France, qui avait été pionnière dans ce domaine, est aujourd'hui un des rares pays de l'Union européenne à ne plus taxer annuellement les possessions de véhicules de tourisme.

Il est nécessaire de créer une vignette carbone pour les véhicules, établie en fonction des émissions de CO₂ de chacun d'entre eux, en cycle urbain et en cycle routier – ce qui pourra permettre de taxer à un moindre degré les véhicules hybrides consommant moins en cycle urbain ou de détaxer les véhicules. Cette taxe serait également applicable aux deux roues à proportion de leurs émissions de CO₂ (en moyenne, 100 gr. CO₂/km contre 150-175 gr. CO₂/km pour les automobiles).

Cette **vignette carbone** pourrait produire une ressource de **l'ordre de 2 milliards d'euros dès 2007**.

Il va de soi que les 4 milliards d'euros ainsi dégagés seraient entièrement affectés à la recherche et au déploiement des filières de substitution. Leur utilisation, strictement affectée par la loi, serait soumise à un contrôle spécifique du Parlement chaque année.

*

* *

Enfin, il faut prendre à bras le corps le problème des transports routiers à long rayon d'action dont la croissance – encore activée par l'élargissement de l'Union européenne – se poursuit, ceci indépendamment de toute considération des émissions de CO₂ que ce secteur génère.

Il ne semble pas possible, dans ce domaine, d'augmenter la taxe à l'essieu qui désavantagerait les transporteurs nationaux.

Il est donc proposé d'établir une taxe annuelle applicable à tous les transporteurs routiers usagers des réseaux d'autoroutes, à l'instar de ce qui a été fait en Allemagne.

VII. MENER UNE ACTION SPÉCIFIQUE DANS LE SECTEUR DES TRANSPORTS

Le secteur des transports est celui dont l'évolution représente la plus grande menace en matière de changement climatique. Mais toute action dans ce domaine est difficile à mener. En effet, la mobilité automobile est un élément essentiel de notre vie économique et elle constitue aussi, du fait de l'évolution des configurations urbaines, une donnée sociale assez rigide.

Mais, dans le même temps, une politique volontariste dans ce domaine peut d'adosser à deux facteurs favorables :

- la progression à venir de la hausse du prix du pétrole,
- et la montée de filières technologiques de substitution qui sont soit applicables comme les biocarburants, soit très proches de la maturité comme l'hybridation ou les motorisations plus économes, soit émergentes comme la voiture électrique.

L'essentiel d'une politique de réduction des émissions de CO₂ dans le secteur du transport reposera dans les vingt années à venir sur l'introduction progressive de ces filières de substitution, **sachant qu'aucune de ces filières ne représente à elle seule la solution au problème. A cette fin, on peut activer deux moyens, la normalisation et la fiscalité, pour accélérer le déploiement de ces filières.**

Mais il serait également souhaitable de mener des expériences infléchissant les pratiques sociales de l'automobile. **L'innovation technologique a ses limites. Elle ne suffira pas. Elle doit être relayée par l'innovation sociale qui doit être promue, encouragée, soutenue.** C'est dans ce domaine que les ruptures les plus prometteuses sont à construire.

A. UTILISER LA FISCALITÉ ET LA NORMALISATION

Pour assurer la substitution progressive d'une partie du pétrole employé dans l'automobile, deux voies se présentent : la normalisation et l'utilisation de la fiscalité.

1. La normalisation

Les indications fixées par la Commission européenne (120g de CO₂ par kilomètre pour les voitures neuves en 2008-2010) sont exemplaires de l'action à poursuivre dans ce domaine. Elles ont, au demeurant donné lieu, dans le projet de loi de finances pour 2006, au vote d'une taxe additionnelle à la taxe d'immatriculation des véhicules automobiles perçues par la région.

Mais, pour être efficace, cette action normative devra :

- **être planifiée à plus long terme,**
- **et lever certaines contradictions** qui existent dans le domaine des biocarburants entre le pourcentage d'introduction de ceux-ci et les normes communautaires environnementales et sanitaires qui empêchent concrètement d'élever ce niveau au-delà de 10 %.

2. La fiscalité

On a vu (cf. Proposition VI) que la solution la plus simple consistant à augmenter très progressivement la TIPP sur une période décennale était à manier avec précaution, compte tenu des effets sociaux qu'elle pourrait avoir dans un contexte où les prix du pétrole s'inscriront à la hausse.

La solution réside donc dans la recréation de la « vignette » sous forme d'une taxe carbone applicable aux véhicules automobiles (y compris les deux roues) et modulée en fonction des émissions de CO₂ des véhicules.

Par ailleurs, on rappellera qu'il est jugé souhaitable d'obtenir une taxe sur l'usage du réseau autoroutier par les transporteurs routiers.

Comment utiliser une partie de ces taxes, dont le rapport immédiat avoisinera deux milliards d'euros et le rapport futur quatre milliards d'euros, pour activer la rénovation des parcs ?

Plusieurs possibilités s'offrent :

- La plus efficace serait une modulation, plus fine que les quatre taux existants, de la TVA. Mais cette voie exige une harmonisation européenne dont on sait qu'elle n'est pas acquise.

- La solution du crédit d'impôt (déjà utilisé pour les véhicules électriques) présente l'avantage d'offrir une réactivité immédiate, de nature à accélérer la rotation du parc, dont on rappellera qu'elle se fait en 15 ans pour la moitié du stock et en 25-30 ans pour la totalité.

Mais elle ne s'adresse pas directement à la frange la moins favorisée de la population qui ne paie pas, ou peu, d'impôt sur le revenu et possède les véhicules les plus anciens.

Il sera donc nécessaire de recourir, dans ce cas, à la subvention.

B. ACTIVER LES EXPÉRIMENTATIONS INFLÉCHISSANT LA PRATIQUE SOCIALE DE L'AUTOMOBILE

La pratique sociale de l'automobile est nécessaire mais elle est quelquefois abusive et souvent inutile.

Infléchir les comportements sur ce point est un enjeu important.

Outre l'amplification des campagnes d'information et la conduite d'une action éducative dans la durée, **l'expérimentation sociale peut être un ressort de l'inflexion des comportements de nos concitoyens.**

Mais pour être efficace, elle doit proposer des voies de substitution offrant des commodités d'emploi proches de celles de l'utilisation d'un véhicule individuel.

Il serait donc nécessaire de multiplier les expériences de mise à disposition de solutions alternatives (gare routière en pleine campagne comme celle ouverte récemment dans l'Essonne, vélos à Lyon, véhicules électriques à La Rochelle, etc.), mais également d'analyser les conditions de leur généralisation.

La combinaison de solutions communicantes sécurisées avec des flottes de mini véhicules électriques urbains permettant l'usage systématique, en ville, de flottes captives de véhicules électriques avec parkings dédiés, devrait aussi être largement expérimentée.

Il serait enfin utile d'examiner dans quelles conditions, physiques et tarifaires, on pourrait développer le ferroutage massif des véhicules individuels, à l'occasion des congés d'hiver, d'été ou des ponts.

VIII. RENFORCER L'ACTION MENÉE DANS LE SECTEUR RÉSIDENTIEL-TERTIAIRE

Ce secteur représente un enjeu important puisqu'il est responsable en France de 33 % des émissions de CO₂.

C'est aussi un domaine d'action dans lequel une politique de normalisation assez continue a été menée depuis 1973, en termes de réglementation thermique. **Cette politique a obtenu des résultats, puisque depuis 1973 et sur les seules quinze dernières années l'efficacité énergétique des logements a augmenté de 10 %.**

Amplifier cette action est aujourd'hui un impératif :

- la réhabilitation des bâtiments anciens pour les mettre à des normes de consommation de chauffage compatibles avec une durabilité de développement est un chantier de très grande envergure. Sur le parc de logements qui existera en 2050, soixante pour cent existent aujourd'hui, avec des taux de consommation moyens au m² de l'ordre de 200 KWh (250 KWh dans le tertiaire), alors que la norme applicable actuellement est de 80 KWh/m² et que la norme qu'il faudrait rapidement atteindre est de 50 KWh/m². **Des estimations fournies par l'ADEME, la division par trois des consommations du parc existant représentera un coût de 400 à 600 milliards d'euros,**
- la construction de logements – et notamment de logements sociaux – s'accélère (420 000 logements mis en chantier en 2005) sous l'effet de la poussée de la demande. Or, **pour des raisons de coût, cette construction qui s'amplifie s'effectue sur la base de normes qui seront dépassées dans quinze ans alors que les constructions sont bâties pour un siècle,**
- l'urbanisme périurbain pavillonnaire se développe – souvent hors des zones desservies par les transports communs. En dix ans, la région Ile-de-France a utilisé la surface de Paris pour construire 30 000 à 40 000 logements par an¹. **Cette urbanisation inspirée du modèle américain a le double inconvénient de contraindre les occupants à un usage quotidien de l'automobile et de bâtir des maisons individuelles dont les normes d'isolation sont moins importantes que celles des immeubles collectifs,**

¹ Chiffres fournis dans le récent rapport du Conseil économique et social : « Les politiques de l'urbanisme et de l'habitat face aux changements climatiques » (avril 2006).

- enfin, les **consommations d'électricité spécifiques** des produits électroménagers et des produits informatiques et audiovisuels se développent.

Au total, il faudrait appliquer les critères d'efficacité énergétique de demain aux logements et bureaux d'avant-hier et celles d'après-demain aux logements et bureaux qui se construisent aujourd'hui.

Des facteurs favorables y contribuent :

- le développement de nouveaux instruments comme **les certificats d'efficacité énergétique des bâtiments** qui devront être fournis à l'occasion de toute transaction à compter du 1^{er} juillet 2006 et celui des certificats d'énergie prévus par la loi sur l'énergie,
- **le renforcement des instruments traditionnels comme le crédit d'impôt** pour les dépenses d'équipement de production d'énergie ou source d'énergie renouvelable, d'isolation thermique ou de régulation de chauffage (qui ne concerne annuellement que 770 000 bénéficiaires),
- **les propositions technologiques nouvelles** qui se développent dans l'ensemble des domaines d'économies d'énergie dans le bâtiment,
- et, enfin, la perception de la montée des prix du fioul domestique et du gaz de chauffage dont on a constaté l'an dernier qu'elle était à la source d'une demande forte d'équipement renforcé de l'efficacité énergétique des logements.

Ce sont ces instruments qu'il sera nécessaire de renforcer pour améliorer le bilan énergétique du secteur résidentiel-tertiaire, tant en matière de bâtiment que de consommation d'électricité spécifique.

A. LE BÂTIMENT

1. Mettre le développement durable au cœur de l'action de l'État

On reproduit aujourd'hui les erreurs commises dans les années soixante où les pouvoirs publics, confrontés à une forte demande sociale de logements, réactivent massivement les aides à la construction pour satisfaire les besoins actuels indépendamment de ce que seront les nécessités de demain.

Or, compte tenu des échéances qui se rapprochent en matière de hausse du prix du pétrole et du gaz naturel et de changement climatique, **il n'est pas admissible de reproduire le schéma qui aboutirait dans trente ans à relancer une action de rénovation urbaine, parce qu'on aura ignoré les exigences du surlendemain.**

Il faut construire plus de logements à haute efficacité énergétique pour ne pas imposer des coûts insupportables aux usagers dès les années à venir.

La croissance des coûts de chauffage rend déraisonnable d'offrir à des populations défavorisées des logements dont le coût de fonctionnement risque d'excéder d'ici quinze ans leurs moyens.

Il sera donc nécessaire de modifier l'attribution de subventions au logement social en renforçant celles-ci pour les constructions à très haute performance énergétique.

2. Planifier la réglementation thermique à long terme

Le plan climat prévoit de durcir la régulation thermique de 10 % tous les cinq ans. Il faudra étendre clairement ces règles sur une **période de vingt ans et utiliser cette réglementation future comme un levier permettant d'accorder des avantages à ceux des constructeurs qui anticiperont sur les normes (cf. *infra* 3).**

Par ailleurs, il faut renforcer les réglementations portant sur les composants et les équipements (matériaux, vitrages, chaudières) de telle sorte que les actions de rénovation menées par des propriétaires individuels soient énergétiquement plus efficaces.

3. Utiliser la réglementation thermique pour un urbanisme plus durable

Du fait de la poussée de la demande de logements et de bureaux, les prix du foncier montent fortement dans les grandes agglomérations et leur périphérie immédiate. Ce qui a deux conséquences en matière de développement durable :

- la hausse des coûts unitaires de surface au détriment d'une meilleure efficacité énergétique des bâtiments ;
- le déport de l'urbanisation au-delà de la périphérie qui renforce l'utilisation quotidienne de l'automobile.

C'est pourquoi il est proposé d'établir, au bénéfice des constructeurs de logements, de bureaux et de commerces, des dérogations aux coefficients d'occupation des sols par ceux d'entre eux qui appliqueront non pas les normes de réglementation thermiques en vigueur, mais celles qui seront applicables cinq, dix ou quinze ans plus tard.

L'ampleur de ces dérogations devrait être modulée en fonction des anticipations d'efficacité énergétique.

4. Structurer l'offre de bâtiments plus efficaces énergétiquement

L'augmentation du prix du fioul domestique et le ressaut de demande d'équipements plus performants en matière de chauffage, d'isolation et de production individuelle d'énergies renouvelables **a permis de constater que l'offre des professionnels était insuffisamment structurée.** Ceci principalement dans deux domaines : l'information et la formation.

On l'a déjà noté, l'information concrète des citoyens qui voudraient analyser les possibilités alternatives de renforcer l'efficacité énergétique de leur logement est faible. Il est nécessaire de la structurer et de la systématiser (*cf. supra Proposition IV-C-2*). L'action de France Télévisions, et en particulier de France 5 sera renforcée en conséquence, y compris par une dotation particulière de financement au titre de la transition énergétique.

Par ailleurs, le rapport précité du Conseil économique et social sur ces problèmes insiste à juste titre sur la nécessité de renforcer les formations initiales et continues dans les métiers du bâtiment, y compris les promoteurs et les architectes, sur le développement durable.

5. Clarifier les conditions d'attribution des certificats d'efficacité énergétiques

La transposition de la **directive européenne sur l'efficacité énergétique des bâtiments** sera effective à compter du 1^{er} juillet 2006. Ces certificats (libellés de A à E) devront être fournis à l'occasion de toute cession ou de toute location.

A l'avenir et en fonction de l'augmentation à venir du prix du fioul domestique et du gaz de chauffage, cet instrument pourra être un levier important dans la rénovation énergétique des bâtiments.

C'est pourquoi il semble important de clarifier les conditions de leur attribution. Ceci d'abord dans deux domaines, la **formation des 2 500 diagnostiqueurs**, et leur **indépendance** vis-à-vis des autres intervenants du secteur (syndic, installateurs divers, etc.), comme cela a été fait, par exemple, pour les entreprises de contrôle technique des véhicules automobiles.

Par ailleurs, il serait nécessaire d'établir des **coûts d'interventions lisibles pour les propriétaires**.

6. Activer la demande de rénovation du parc existant

Il s'agit d'un enjeu majeur, puisque même si les préconisations qui précèdent pourraient permettre de mettre aux normes d'après-demain les immeubles que l'on construit aujourd'hui et de disposer d'une partie de parc efficace énergétiquement en 2030-2050, **soixante pour cent du parc qui sera disponible en 2050 est déjà construit aujourd'hui**.

a) Créer de nouveaux instruments bancaires

La création de comptes ou de plans d'épargne « verts » bénéficiant de bonification d'intérêts pourrait permettre de poser les bases d'un préfinancement de travaux de rénovation. **Ce préfinancement serait particulièrement efficace dans des domaines où la hausse des prix du pétrole permettra d'accélérer les retours sur investissements**.

Une innovation importante dans ce domaine pourrait être l'extension de ces dispositions aux copropriétés sans obligation de décisions unanimes.

b) Amplifier l'incitation fiscale

Le crédit d'impôt, de l'article 200 quater A du code général des impôts, pour les dépenses afférentes aux dépenses de gros équipements, d'équipements de production d'énergies renouvelables et de matériaux d'isolation thermique est un instrument efficace.

Mais, il est nécessaire – pour une durée d'une vingtaine d'années – de le renforcer :

- en **augmentant les pourcentages de déductibilité** et le volume du crédit d'impôt,
- en unifiant les taux des déductions, **en l'étendant aux résidences secondaires**, et en y rendant éligible une partie des dépenses **d'installation de ces équipements**.

B. RENFORCER LES NORMES SUR LES CONSOMMATIONS D'ÉLECTRICITÉ SPÉCIFIQUES

Les consommations d'énergie spécifiques sont en augmentation régulière du fait de la croissance du taux d'équipement des ménages en électroménager et de l'apparition de nouveaux besoins en équipements audiovisuels et informatiques.

Même si des efforts ont été menés dans le domaine de l'électroménager, il existe un gisement d'économies important dans ce secteur. **La France est dans la moyenne européenne mais en retard par rapport à des pays comme l'Allemagne et les Pays-Bas** : 40 % d'équipements de classe A pour le froid (75 % aux Pays-Bas), 60 % d'équipements de classe A pour le lavage (85 % aux Pays-Bas).

Suivant une source du CEREN, on économiserait, d'ici 2020, 42 % sur l'éclairage, le lavage et le froid si tous nos équipements étaient remplacés par les appareils actuellement les plus économes.

S'agissant de l'éclairage, on pourrait économiser 30 % dans le secteur des services (bureaux et commerces).

Le secteur des produits audiovisuels et informatiques, dont les consommations sont en développement, présente des possibilités de progression encore plus importantes puisque peu d'actions y ont été menées sur les consommations d'énergie et que les veilles d'appareils sont très consommatrices (elles représentent une consommation égale à celle des téléviseurs et des ordinateurs domestiques).

Sur ces trois secteurs de consommation d'électricité spécifiques (éclairage, électroménager, produits audiovisuels et informatiques), les technologies sont disponibles pour économiser l'énergie. **Il est donc urgent de durcir les normes applicables à l'ensemble de ces équipements.**

IX. IMPLIQUER FORTEMENT LES COLLECTIVITÉS TERRITORIALES

A chaque échelon de gestion locale, les collectivités territoriales doivent être des intervenants privilégiés de la lutte contre l'effet de serre.

D'une part, parce qu'elles constituent un **relais indispensable** de pédagogie et d'information vis-à-vis des citoyens. Monter des actions pilotes sous tel ou tel aspect du développement durable est une des façons les plus efficaces de sensibiliser les populations à l'importance des enjeux dans ce domaine.

D'autre part, parce qu'elles **gèrent elles-mêmes des activités consommatrices** d'énergie fossile. Sans que cette liste soit exhaustive, on mentionnera :

- les chauffages urbains en région,
- les services publics municipaux, départementaux ou régionaux dans les domaines scolaires ou sanitaires,
- l'éclairage public,
- et les flottes publiques de transport – des transports communs au ramassage scolaire.

Enfin, parce qu'elles ont un **rôle moteur dans la structuration urbaine**, dont on sait qu'elle peut être un facteur décisif – en particulier dans le domaine des transports – de consommation d'hydrocarbures fossiles.

Quelques-unes de ces collectivités mènent des politiques intéressantes : Dunkerque, en particulier en matière de chauffage urbain, La Rochelle en matière de mise à disposition de véhicules électriques, Chalon-sur-Saône qui a développé un plan municipal très complet de lutte contre l'effet de serre, Rennes qui mène des expériences intéressantes de redensification urbaine afin d'éviter les déplacements automobiles.

Mais, pour exemplaires qu'elles soient, ces actions demeurent isolées. Il est donc de première importance de pouvoir impliquer l'ensemble des collectivités territoriales dans la lutte contre le changement climatique.

A cette fin, trois instruments financiers pourraient être utilisés :

1. Inclure le développement durable dans les contrats de Plan État-Régions

Comme le souligne le rapport précité de la mission d'information de l'Assemblée nationale sur l'effet de serre, les contrats de Plan État-Régions qui sont en cours de renégociation pour la période 2007-2013 devront prendre en compte le futur changement climatique. Il semble que les pouvoirs publics aient récemment décidé de mener cette action.

2. Moduler les dotations d'équipement et de fonctionnement au regard des politiques de lutte contre l'effet de serre menées par les collectivités

C'est naturellement un sujet sensible qui ne pourra être mis en œuvre qu'après une large concertation avec l'ensemble des collectivités intéressées.

Mais il est essentiel de donner une impulsion à la lutte contre l'effet de serre à l'échelon local.

Il est également conforme à l'équité de conférer un avantage financier aux collectivités qui oeuvrent au développement durable au détriment de celles qui sont inactives dans ce domaine.

3. Proposer des bonifications d'intérêt aux investissements des collectivités effectués dans le domaine de la lutte contre l'effet de serre

X. PRÉPARER L'APRÈS 2030

Malgré des actions fortes vers la transition énergétique en vue de réduire les émissions de gaz à effet de serre, **la stabilité du modèle énergétique mondial en 2030 ne sera pas assurée**. Du fait de la raréfaction et du renchérissement du pétrole et du gaz naturel à cette échéance par suite de causes diverses, comme la durée nécessaire pour modifier le mix énergétique mondial.

Il est donc nécessaire de préparer l'après-2030 en encourageant dès à présent la recherche dans quatre domaines stratégiques :

1. Les nanotechnologies et la modélisation de l'infiniment petit

La quatrième révolution industrielle qui se prépare résultera d'une meilleure connaissance des réactions de la matière à l'échelle atomique ; elle reposera sur l'alliance des nanotechnologies et de la modélisation des réactions de l'infiniment petit. Les nanotubes ou nanostructures de carbone sont susceptibles de développements imprévisibles mais variés.

Il sera nécessaire de poursuivre et d'amplifier l'effort de recherche dans ce domaine.

De même, les usages systématiques des puces et pucerons électroniques, des techniques RFID et des usages des technologies de l'information et des communications qui auront de plus en plus de débouchés favorisant le développement durable, de la domotique commandée à distance jusqu'à l'aménagement raisonné de l'espace.

2. La fission nucléaire de génération IV

La réussite des filières de fission de génération IV est porteuse d'une double promesse :

- celle d'une énergie dont les réserves se chiffrent en milliers d'années,
- et celle d'une coproduction massive d'hydrogène à haute température.

Le consortium international qui prend en charge les recherches sur les 5 types de réacteurs expérimentaux proposés prévoit d'engager, d'ici 2015, 1 milliard de \$ pour chacun de ces réacteurs.

Aux dires des personnes entendues, cette somme semble suffisante à cet horizon, mais **la part consacrée par la France à ce type de recherche demeure insuffisante** (de l'ordre de 40 millions d'euros par an de dépenses directes). Comme le note le rapport précité de MM. Christian Bataille et Claude Birraux sur « *Les nouvelles technologies de l'énergie et la séquestration du dioxyde de carbone : aspects scientifiques et techniques* », **il serait nécessaire de doubler rapidement ces dépenses pour que notre pays qui est en pointe sur certaines de ces filières le demeure.**

3. La filière hydrogène

Tant en matière de coût de production – et surtout de coût de production sans émission de gaz à effet de serre –, de déploiement d'infrastructures de distribution que de piles à combustible utilisables dans l'automobile, la filière hydrogène est encore éloignée d'un stade de maturité industrielle de masse.

Mais à terme, et en fonction de la raréfaction et du renchérissement des hydrocarbures, **cette filière est porteuse d'une solution d'avenir.**

Il convient donc d'activer les recherches dans ce domaine et y **multiplier progressivement les expérimentations** en liaison avec l'Union européenne (cf. *supra* Proposition III-B-3).

4. La fusion nucléaire

ITER se met peu à peu en place.

Même si les perspectives de débouchés industriels de la fusion nucléaire sont très lointaines, il est nécessaire de maintenir un flux de recherches dans ce domaine, ne serait-ce que parce qu'il est aussi connexe à celui des nouveaux matériaux qui prépare le monde industriel de demain.

ANNEXES

ANNEXE N° 1

ADOPTION PAR L'OFFICE

Lors de sa réunion du mardi 27 juin 2006, l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques a adopté à l'unanimité le tome I « *Changement climatique et transition énergétique : dépasser la crise* » du rapport de MM. Pierre Laffitte et Claude Saunier, sénateurs, sur « *Les apports de la science et de la technologie au développement durable* », assorti d'un amendement présenté par son Président, M. Henri Revol, sur la nécessité de maintenir un flux de recherches conséquent sur la fusion nucléaire.

ANNEXE N° 2

LISTE DES PERSONNES AUDITIONNÉES

I. PERSONNES AUDITIONNÉES EN FRANCE

Mme	Nathalie	ALAZARD	Directeur Direction des études économiques	Institut français du pétrole (IFP)
M.	Francis	ALLARD	Professeur	Université de La Rochelle
Dr.	Stéphane	AMARGER	Directeur du Laboratoire de technologie	Hitachi Europe
M.	Miguel	AUBOUY	Ingénieur service microsystèmes et objets communicants	MINATEC IDEAs Laboratory
M.	Philippe	AYOUN	Responsable du département prospective, développement et environnement	Direction générale de l'aviation civile (DGAC)
M.	René	BALLY	Professeur	Université Claude Bernard
M.	Yves	BAMBERGER	Directeur de la division R&D	EDF
M.	Philippe	BARDEY	Président	ACRI
M.	Denis	BARONDEAU	Directeur marketing et distribution	PHILIPS France Eclairage
M.	Olivier	BERNARD	Responsable du projet « COMORE »	INRIA
Mme	Pascale	BERRUYER	Chef du service support interface technologique	CEA Grenoble
M.	Christophe	BERT	Directeur du développement technologique (pôle matériaux haute performance)	Saint-Gobain CREE
M.	Jean	BESSE	Directeur des relations institutionnelles	SNECMA
M.	Gilles	BILLEN	Professeur	Université Pierre et Marie Curie

M.	René	BLANCHET	Recteur	Sophia-Antipolis
M.	Henri	BORDENAVE	Responsable unité ingénierie autobus équipements	Régie autonome des transports parisiens (RATP)
M.	Edouard	BRÉZIN	Président	Académie des Sciences
Mme	Hélène	BURLET	Chef du Service modélisation, mécanique et milieux extrêmes	CEA Grenoble
M.	Franck	CARRÉ	Directeur programme pour les systèmes du futur	CEA
M.	Thierry	CHAMBOLLE	Conseiller du Président	Suez
M.	Jean-Louis	CHAMBON	Directeur en charge du développement durable	CEA
M.	Philippe	CHARVIS	Directeur	Géosciences Azur
M.	Joël	CHENET	Vice-President Marketing & Business Development	Alcatel Alenia Space
M.	Daniel	CLÉMENT	Directeur de recherche	ADEME
M.	Jean-Frédéric	CLERC	Directeur adjoint Directeur adjoint Direction de la prospective, de la stratégie et de l'évaluation	CEA Grenoble
M.	Thibaud	CORADIN	Professeur	Université Pierre et Marie Curie
M.	Alain	COUTROT	Directeur de la recherche et de la technologie	SNECMA
Mme	Isabelle	CZERNICHOWSKI	Direction de la recherche	BRGM
Mme	Anne	de GUIBERT	Directeur de la recherche	SAFT
M.	Ghislain	de MARSILY	Professeur	Université Pierre et Marie Curie
M.	Joël	de ROSNAY	Directeur de la prospective et de l'évaluation	Cité des Sciences et de l'Industrie
M.	Philippe	de SAINT-AULAIRE	Vice-President Environmental Affairs	Airbus Industrie
M.	Bernard	DELAY	Département des Sciences de la vie	CNRS

M.	Claude	DELPOUX	Directeur des assurances de biens et de responsabilité	Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA)
Mme	Barbara	DEMENEIX	Directeur du département régulations, développement et diversité moléculaire	Museum national d'histoire naturelle
M.	Jacques	DONIAT	Président-directeur général	Société de conseils et de prospective scientifique (SCPS)
M.	Denis	DONIAT	Président du conseil de surveillance	Société de conseils et de prospective scientifique (SCPS)
M.	Alain	DUCASS	Chef du pôle aménagement numérique	DATAR
M.	Jean-Claude	DUPLESSY	Laboratoire des sciences du climat et de l'environnement	CNRS Gif-sur-Yvette
M.	Antoine	FLAHAULT	Département d'épidémiologie, systèmes d'information et modélisation	Faculté de médecine de Saint-Antoine
M.	Bertrand-Pierre	GALEY	Directeur général	Museum national d'histoire naturelle
M.	Philippe	GARDERET	Directeur de l'innovation et des technologies émergentes	AREVA
M.	Maurice	GEORGES	Directeur de cabinet	Direction générale de l'aviation civile (DGAC)
M.	Malik	GHALLAB	Directeur	LAAS
M.	Ghislain	GOSSE	Président	Centre INRA de Lille
M.	Jean-Luc	GOUZE	Directeur de recherche	INRIA
M.	Olivier	GRÉMONT	Directeur du département Gestion sous mandate	Caisse des Dépôts

M.	Michel	GRIFFON	Conseiller pour le développement durable	Centre de coopération internationale en recherche agronomique (CIRAD)
M.	Jacques	GROS	Directeur du site	IBM Centre d'études et de recherches de La Gaude
M.	François	HÉRAN	Directeur	Institut national d'études démographiques (INED)
M.	Didier	HOFFSCHIRE	Assistant au délégué au développement durable	CEA
M.	Thomas	JAGER	Ingénieur	CEA Grenoble
M.	Philippe	JARRY	Vice-President Product Policy	Airbus Industrie
M.	Philippe	JEAN-BAPTISTE	Laboratoire de climatologie et de l'environnement	CEA
M.	Claude	JEANDRON	Directeur-adjoint de l'environnement et du développement durable	Electricité de France
M.	Jacques	JOUAIRE	Directeur programme "réseau environnement"	EDF
M.	Jacques	JUPILLE	Directeur	Institut des nanosciences de Paris
M.	Laurent	KOTT	Délégué général aux transferts technologiques	INRIA
M.	Philippe	LAGET	Responsable du développement durable	Société Générale
Mme	Monique	LALLEMAND	Directeur du programme interdisciplinaire énergie	CNRS-INSA Lyon
M.	André	LALLEMAND	CETHIL	INSA Lyon
M.	Claude	LAMY	Professeur Département chimie	Université de Poitiers
M.	Pierre	LASCOUMES	Directeur de recherche	CEVIPOF
M.	Richard	LAVERGNE	Secrétaire général	Observatoire de l'énergie et des matières premières
M.	Michel	LAZDUNSKI	Professeur	Institut universitaire de France

M.	Gilles	LEBLANC	Directeur	Centre d'économie industrielle (CERNA)
Mme	Jacqueline	LECOURTIER	Directeur scientifique	Institut français du pétrole
M.	Jean-Luc	LEDYS	Directeur général	PICOGIGA International
M.	Jean-Michel	LÉGER	Chef du laboratoire capteurs, antennes et récupération d'énergie	CEA Grenoble
M.	Jean-Jacques	LEGUAY	Directeur adjoint de la direction des sciences du vivant	CEA
M.	Benoît	LEGUET	Chef de projet	Caisse des Dépôts
M.	Bertrand	LIMOGES	Chargé d'Affaires	CDC Entreprises
M.	Jacques	LIVAGE	Professeur	Collège de France
M.	Claude	LOBRY		INRIA
M.	Laurent	LONDEIX	Responsable du laboratoire DIAM	France Telecom R&D
M.	Paul	LUCCHESI	Chef de projet Hydrogène	Commissariat à l'énergie atomique (CEA)
M.	Joseph	MAIRE	Directeur projet "réseau intelligent"	EDF
M.	Laurent	MALIER	Animation Programmes	CEA-LETI
M.	Pierre-Charles	MARIA	Chargé de mission	Faculté des sciences de Nice
M.	Didier	MARSACQ	Directeur du Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et des nanomatériaux (LITEN)	CEA Grenoble
M.	Alain	MAUGARD	Président	Centre scientifique et technique du bâtiment (CSTB)
Mme	Nicole	MERMILLIOD		CEA-LETI
M.	Arnaud	MINE	Président	APEX BP SOLAR

M.	Jean	MINIER	Direction du soutien aux programmes – Ingénierie et exploitation	CEA Grenoble
M.	François	MOISAN	Directeur scientifique	ADEME
M.	Gérard	MONDELLO	Économiste	GREDEG-CNRS
Mme	Marie-Dominique	MONTANGERAN D	Attachée parlementaire	Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA)
M.	Jean-Claude	MÜLLER	Ingénieur de recherche	Laboratoire de Physique et Applications des Semi-conducteurs (PHASE)
M.	Jean-Claude	NATAF	Directeur du pole Solutions communicantes sécurisées	STMicroelectronics
Mme	Michèle	PAPPALARDO	Présidente	ADEME
Mme	Corinne	PASTOR	Directrice département formation et télé-activités	Fondation Sophia-Antipolis
M.	Michel	PETIT	Président de la section scientifique et technique	Conseil général des technologies de l'information
M.	Michel	PILLET	Gérant	AMC
Mme	Valérie	PLAINEMAISON	Secrétaire générale	Fédération européenne des services en efficacité et intelligence énergétique
M.	Nicola	POCHETTINO	Energy Analyst Economic Analysis Division	International Energy Agency
M.	Henri	PRÉVOT	Ingénieur général des Mines	Conseil général des Mines
M.	Pierre	RADANNE	Ancien Président	ADEME
Mme	Claire-Anne	REIX	Direction observation et sciences	Alcatel Alenia Space
M.	Jean-Louis	ROBERT	Professeur	Université de Montpellier
M.	Jean-Jacques	ROMATET	Directeur general	CHU Nice

Dr.	Etienne	RUELLAN	Directeur	Géosciences Azur
M.	Jean-Louis	SANCHEZ	Directeur de recherche au CNRS	LAAS
M.	Dominique	SANTINI	Directeur général adjoint	Generali Assurances IARD
M.	Alban	SCHULTZ	Direction des affaires publiques	Electricité de France
M.	Werner	SOMMER	Président Directeur général	SAP LABS France
M.	Grégory	SOUDAN	Direction des assurances de biens et de responsabilité	Fédération française des sociétés d'assurances (FFSA)
Mme	Pascale	SOURISSE	Président-directeur general	Alcatel Alenia Space
M.	Willy	TOMBOY	Environmental Officer General Manager	TOYOTA Europe
M.	Emmanuel	TRAMOND	Directeur du département matériel roulant bus	Régie autonome des transports parisiens (RATP)
M.	Claude	VAUCHIER	Responsable de la ligne programme microcapteurs pour la biologie	CEA Grenoble
M.	Marc	VERGNET	Président-directeur général	VERGNET SA
M.	Jean-Pierre	VIGOUROUX	Directeur des programmes Chargé des relations avec le Parlement	CEA
M.	Jean	VIRIEU	Directeur	Géosciences Azur
M.	Jean	VUILLEMIN	Directeur scientifique	INRIA
M.	Jean	WEISSENBACH	Directeur	Genoscope

II. PERSONNES AUDITIONNÉES AUX ETATS-UNIS

Mr.	Paul	ALIVISATOS	Director of the Materials Sciences Division	Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL)
Mr.	Vince	BATTAGLIA		Berkeley Electrochemical Research Council
Mr.	François	BERGASSE	Chief Executive Officer	EAS Energy
Mrs.	Courtney	BERNER	Development Associate	Worldwatch Institute
Dr.	Peter	BACKLUND	Director of Research Relations	National Center for Atmospheric Research (NCAR)
Mrs.	Maureen	BORNHOLDT	Program Manager	Department of Interior
Mr.	Lee A.	BOUGHEY	Stakeholder Partnerships Manager Outreach & Public Affairs Office	National Renewable Energy Laboratory (NREL)
Dr.	Dallas	BURTRAW	Senior Fellow	Resources for the Future
Mrs.	Nancy	CARLISLE	Federal Energy Management Program	NREL
Mr.	Stephen	CHU	Director	LBNL
Mr.	Matt	CLOUSE	Director Green Power Partnership Office of Atmospheric Programs Office of Air and Radiation	Environmental Protection Agency (EPA)
Mr.	Walter	CRUICKSHANK	Deputy Director Mineral Management Service	Department of Interior
M.	Frédéric	DESAGNEAUX	Consul général	Consulat général de France à San Francisco
Mrs.	Anne	DILLON	Researcher Center for the Basic Sciences	NREL

Mr.	John	EARNHARDT	Policy Communications Media Relations Worldwide Government Affairs	CISCO Systems
Mr.	Donald C.	ERBACH	National Program Leader Engineering & Energy	Agricultural Research Service (USDA)
Mr.	Andrew	FANARA	Product Development Manager Office of Air and Radiation	Energy Star (US Environmental Protection Agency)
Mr.	Robert L.	FIREOVID	National Program Leader Nutrition, Food Safety and Quality	USDA
Mr.	Christopher	FLAVIN	President	Worldwatch Institute
Mrs.	Katherine	FLEMING BUCKLEY	Air & Climate Program Manager	Energy Star
Dr.	Peter	GENT	Chairman Scientific Steering Committee	NCAR
Dr.	Robert	HARRISS	Senior Scientist Institute for the Study of Society & Environment Societal-Environmental Research & Education laboratory	NCAR
Mr.	Michael J.	HEBEN	Senior Scientist Center for the Basic Sciences	NREL
Mrs.	Eileen	HERRERA	International Affairs Specialist	USDA
Mrs.	Susan	HOCK	Director Electric & Hydrogen Systems Center	NREL
Mrs.	Paula	HUGHES	Human Resources Manager Employee Relations	CISCO Systems
Mrs.	Suzanne	HUNT	Biofuels Project Manager	Worldwatch Institute
Mr.	Kevin D.	HURST	Senior Policy Analyst Executive Office of the President	National Science & Technology Council
Mr.	Ronald	JUDKOFF	Director Center for Buildings and Thermal Systems	NREL

Mr.	Lawrence L.	KAZMERSKI	Director National Center for Photovoltaics	NREL
Dr.	Timothy	KILLEEN	Director	NCAR
M.	Philippe	LARRIEU	Consul général	Consulat général de France à Los Angeles
Mr.	Theodore U.	MARSTON	Senior Vice-President & Chief Technology Officer	Electric Power Research Institute (EPRI)
Mr.	Charles R.	McGOWIN	Technical Leader Wind Power Generation	EPRI
Mr.	Paul	MEAGHER	Manager International Programs	EPRI
Dr.	Linda	MEARNS	Director Institute for the Study of Society & Environment Societal-Environmental Research & Education laboratory	NCAR
Mr.	Dale	MEDEARIS	International Program Manager for Europe Office of Western Hemisphere and Bilateral Affairs Office of International Affairs	Energy Star
Mrs.	Celia I.	MERZBACHER	Executive Office of the President	National Science & Technology Council
Mr.	Rommel	NOUFI	Principal Scientist Polycrystalline Thin-Film PV Group	NREL
Mr.	Bette L.	OTTO-BLIESNER	Scientist, Deputy Head Paleoclimate Modeling Group	NCAR
Mrs.	Karen	PALMER	Darius Gaskins Senior Fellow	Resources for the Future
Mr.	William	PIZER	Fellow	Resources for the Future
Mrs.	Janice	ROONEY	Outreach & Public Affairs Office	NREL
Mr.	Dave	ROSSETTI	Vice President Strategic Software Technology	CISCO Systems

Mr.	Richard	RUSSO	Head Environmental Energy Technical	LBNL
Mrs.	Rachel S.	SCHMELTZ	Product Manager	Energy Star
Mr.	Richard	SCHOMBERG	VP Research & New Technologies	Electricité de France International North America, Inc
Mr.	Tyson	SLOCUM	Research Director Energy Program	Public Citizen (national, non profit consumer advocacy organization)
Mr.	Steven R.	SPECKER	President & Chief Executive Officer	EPRI
Mrs.	Martha	SYMKO-DAVIES	Senior Project Leader	NREL
Dr.	Kevin	TRENBERTH	Head of Climate Analysis Section	NCAR
Dr.	Pai-Yei	WHUNG	Director Office of International Research Programs	USDA
Dr.	Larry	WINTER	Deputy Director	NCAR

III. PERSONNES AUDITIONNÉES EN ALLEMAGNE

Dr.	Michael	BÖL	Directeur	Deutsche Energie Agentur (DENA)
Mme	Eva	DELABRE	Responsable de la communication	Bosch und Siemens Hausgeräte (BSH)
Dr.	Eckhard	DINJUS	Professeur de chimie	Forschungszentrum Karlsruhe
Prof.	Rolf	EMMERMAN	Directeur	GFZ
Mr.	Hans	ERHORN	Directeur	Fraunhofer Institut Bauphysik (IBP)
Dr.	Peter	FRITZ	Membre du directoire	Forschungszentrum Karlsruhe
Mr.	Christian	GRUBER	Directeur	MAN Nutzfahrzeuge
Mr.	Hans-Jürgen	HAHN	Directeur general du développement technologique	MAN Nutzfahrzeuge
Mr.	Eberhard	HIPP	Directeur de département	MAN Nutzfahrzeuge
Mr.	Tobias	MARSEN	Conseiller	Deutsche Energie Agentur (DENA)
Dr.	Herbert	MROTZEK	Directeur du département de protection de l'environnement	Bosch und Siemens Hausgeräte (BSH)
Dr.	Klaus	MÜSCHEN	Directeur	Umwelt Bundes Amt (UBA)
Dr.	Gunnar	PAUTZKE	Directeur du marketing	Bosch und Siemens Hausgeräte (BSH)
M.	Thierry	PFLIMLIN	Président	Total Allemagne

Dr.	Jutta	REICHERT	Responsable de la coordination	Abayfor
Dr.	Thorsten	SCHNEIDERS	Responsable de la politique énergétique	E.ON Energie
M.	Patrick	SCHNELL	Directeur des énergies nouvelles	Total Allemagne
Dr.	Volker	WITWERT	Directeur adjoint	Fraunhofer Institut Solare Energiesystem e (ISE)

IV. PERSONNES AUDITIONNÉES À LA COMMISSION EUROPÉENNE

M.	Laurent	BONTOUX	DG Recherche	Commission européenne
M.	Jean-Paul	DECAESTECKER	Chef d'unité Energie et Questions atomiques	Conseil de l'Union européenne
M.	Jacques	DESCHAMPS	DG Recherche	Commission européenne
M.	Alfonso	GONZALEZ FINAT	Directeur DG Energie et Transports	Commission européenne
M.	Patrick	ROUSSEAUX	Unité Électricité et Gaz DG Transport & Énergie	Commission européenne
M.	Marc	STEEN	DG Énergie et Transports	Commission européenne

V. PERSONNES AUDITIONNÉES EN CHINE

M.	Stefan	AGNE	Membre du programme sino-européen sur l'énergie et l'environnement	Délégation pour la Commission européenne
M.	Bernard	BELLOC	Conseiller pour la science et la technologie	Ambassade de France en Chine
M.	Yves	BOUTIN	Directeur	PSA
M.	Stéphane	CIENEWSKI	Adjoint au Chef de la mission économique	Ambassade de France en Chine
M.	Gérard	DELEENS	Directeur	Total
M.	Jean-François	DI MEGLIO	Directeur pour la Chine	BNP PARIBAS
M.	Peijun	GAO	Membre du programme sino-européen sur l'énergie et l'environnement	Délégation pour la Commission européenne
M.	Philippe	GUELLUY	Ambassadeur de France en Chine	
M.	Jia	HUA	Directeur des Affaires étrangères	Municipalité de Suzhou
M.	Long	JIN	Président	Institut de recherche SINOPEC
M.	Rémi	LAMBERT	Attaché de coopération technique	Ambassade de France en Chine
M.	Junfeng	LI	Secrétaire général	Agence pour l'énergie renouvelable (CREIA)
M.	Dadong	LI	Président	Research Institute of Petroleum Processing
M.	Shan	LI BAO	Directeur de l'énergie	Ministère de la Science et des Technologies (MOST)

Mme	Wang	LIFANG	Directeur	Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences
M.	Matthieu	MASQUELIER	Mission pour la science et la technologie	Ambassade de France en Chine
M.	Hong	NIE	Directeur général	Research Institute of Petroleum Processing
M.	Yueming	NIU	Président	Parc technologique de Suzhou
M.	Olivier	RICHARD	Directeur	Agence française de développement
M.	Hingli	SHI	Professeur	Center for Renewable Energy Development (CRED)
M.	Alain	TOURNYOL CLOS	du Conseiller nucléaire	Ambassade de France en Chine
M.	Lifang	WANG	Directeur	Vehicle Electronics Research Group
M.	Wei	WU	Directeur technique	Research Institute of Petroleum Processing
M.	Zhaodong	ZHANG	President	Peking University
M.	Yousheng	ZHANG	Director fo Research	Energy Research Institute