



Philippe Jean-Baptiste

A2000105



FR0201083

COMMISSARIAT À L'ÉNERGIE ATOMIQUE

Gestion INIS
Doc. Enreg. le <i>30/11/2002</i>
N° TRN <i>F.R.0.2.0.1.0.83</i>

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET NOUVELLE DONNE ÉNERGÉTIQUE

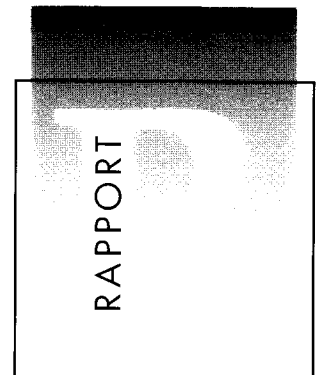
par

**Philippe JEAN-BAPTISTE (Cea),
René DUCROUX (Cirene)**

DIRECTION DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

LABORATOIRE DES SCIENCES DU CLIMAT
ET DE L'ENVIRONNEMENT

CEA SACLAY



DIRECTION DES TECHNOLOGIES
DE L'INFORMATION

**RAPPORT
CEA-R-5969**

« CHANGEMENT CLIMATIQUE ET NOUVELLE DONNE ÉNERGÉTIQUE »

Résumé: La question du réchauffement planétaire devient un élément majeur et incontournable de la politique énergétique mondiale. Actuellement, 22 milliards de tonnes de CO₂ sont rejetées dans l'air annuellement par l'utilisation des combustibles fossiles. Alors que les approches basées sur la stimulation des puits naturels de CO₂ (reforestation, changements des pratiques agricoles,...) permettent seulement de gagner du temps pour les décennies à venir, les solutions garantissant une diminution durable des émissions de CO₂ s'appuient sur la maîtrise de l'énergie, le développement des techniques de capture et de stockage géologique des rejets industriels de CO₂ et un recours accru aux énergies non-fossiles telles que hydraulique, nucléaire, éolien, biomasse ou solaire....

L'objectif de la modification du mixte énergétique mondial est de réduire le ratio actuel de CO₂ émis par unité d'énergie produite (2.6 tonnes de CO₂ par tonne d'équivalent pétrole) à 0.5-1.1 tCO₂/tep à l'horizon 2100, afin de garantir les besoins mondiaux en énergie tout en stabilisant la teneur atmosphérique en CO₂ autour de 550 ppm. Cet objectif requiert que chaque énergie soit utilisée dans les conditions spécifiques pour lesquelles ses atouts sont valorisés de manière optimale. Avec l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire est à l'heure actuelle la seule technologie disponible de production intensive d'énergie sans CO₂. L'énergie éolienne, grâce aux progrès importants dans la technologie des aérogénérateurs, est celle qui se développe au rythme le plus soutenu, avec un potentiel estimé global qui pourrait avoisiner celui de l'hydraulique, et une compétitivité économique qui s'améliore. Le recours aux autres types d'énergies non-fossiles (solaire, géothermie, biomasse) semble devoir rester marginal au cours du XXI^{ème} siècle. Des résultats substantiels sont possibles sur des périodes relativement courtes comme le montre le cas de la France qui, en sept ans (1979-1986), a réduit ses émissions de CO₂ de 27% tout en augmentant sa consommation d'énergie.

2001 Commissariat à l'Energie Atomique – France

« ENERGY POLICY AND CLIMATE CHANGE »

Abstract. Twenty-two billion tonnes of carbon dioxide (CO₂) are released in the air each year from the burning of fossil fuels. The problem of these massive emissions of CO₂ and their climatic impact have become major scientific and political issues. Future stabilization of the atmospheric CO₂ content requires a drastic decrease of CO₂ emissions worldwide. While enhancing natural carbon sinks (reforestation, soils conservation, etc...) can only buy time for the next decades, energy savings, CO₂ capture/storage and the development of non-fossil energy sources (hydropower, nuclear, windpower,...) can be highly beneficial. In order to secure future energy needs while stabilizing the CO₂ atmospheric concentration around 550 ppm, the ratio of the CO₂ emitted per unit of energy produced must decrease from 2.6 tCO₂/toe to 0.5-1.1 tCO₂/toe by 2100. In a growing world economy, now dependent on fossil fuels for 90% of its energy, this will require a vast increase in the supply of carbon-free power. Among these energy sources, hydropower and nuclear energy (operated under western safety and environmental standards) are the most readily available sources capable of supplying vast amount of energy at a competitive price. Wind power is also to be encouraged, as it is expected to approach the competitiveness threshold soon. The French example, where fossil fuel CO₂ emissions were cut by 27% in a matter of a few years (1979-1986) despite increasing energy consumption, suggests that implementing CO₂ stabilization is technically feasible at a competitive price.

2001 Commissariat à l'Energie Atomique - France

- Rapport CEA-R-5969 -

CEA Saclay
Direction des Sciences de la Matière
Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement

CHANGEMENT CLIMATIQUE ET NOUVELLE DONNE ÉNERGÉTIQUE

par

Philippe JEAN-BAPTISTE (Cea), René DUCROUX (Cirene)

Avril 2001

SOMMAIRE

1. Introduction

2. Utilisation rationnelle de l'énergie

3. Risque climatique et nouvelle donne énergétique

3.1 La maîtrise de l'énergie

3.2 La gestion du cycle du carbone

- capture et séquestration du CO₂

- piégeage naturel du CO₂

3.3 L'évolution du mixte énergétique

- les atouts actuels du gaz naturel

- le développement des énergies non-fossiles

- l'énergie nucléaire

- les énergies renouvelables

4. Aspects économiques

5. Conclusions

1. INTRODUCTION

Durant des millénaires, l'humanité a été confrontée à la pénurie d'énergie. Les principales sources d'énergie mobilisables, de rendement très limité, étaient alors la traction animale, l'énergie éolienne (moulins à vent, marine à voile), l'hydraulique de basse énergie (moulins à eau) et la biomasse (pour les besoins domestiques principalement). Ce n'est que depuis deux siècles que, grâce au progrès scientifique, la contrainte énergétique s'est desserrée progressivement avec la possibilité de tirer partie de sources d'énergies plus concentrées : charbon, pétrole, gaz, uranium. Cette révolution a permis du même coût un essor économique sans précédent (fig.1).

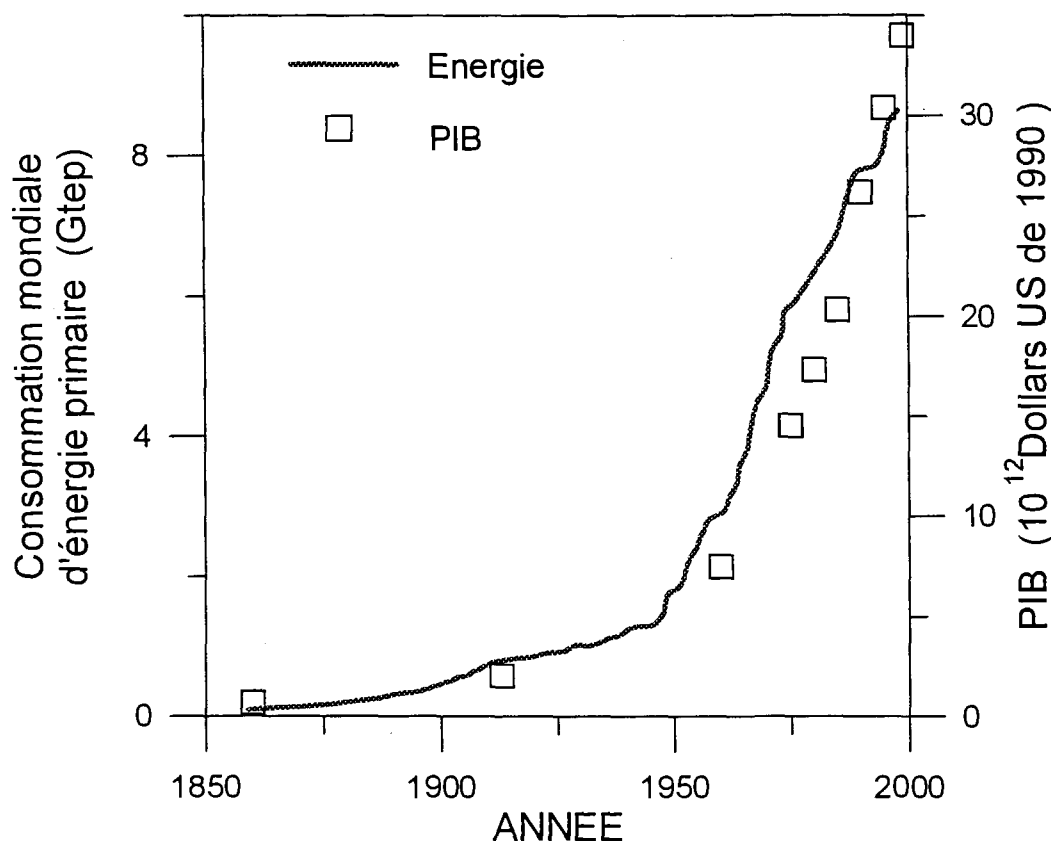


Fig.1 : Evolution de la consommation énergétique mondiale [1,2] et du PIB mondial [3,4] sur la période 1850-2000

2. UTILISATION RATIONNELLE DE L'ENERGIE

L'apparente abondance actuelle des énergies fossiles et fissiles ne doit toutefois pas faire oublier que sur le long terme, ces énergies ne sont pas un bien inépuisable. L'homme doit sans cesse améliorer les techniques d'exploration et d'exploitation pour accéder à de nouveaux gisements et ainsi compenser la

consommation progressive des réserves mondiales (fig.2). De plus, la production et la consommation d'énergie ne sont pas sans conséquence sur l'environnement. Une utilisation rationnelle de l'énergie est donc indispensable pour :

- assurer une relative pérennité des ressources énergétiques sur le long terme
- en faciliter l'accès aux pays en développement, dont les besoins futurs sont importants
- préserver l'environnement et la qualité de vie des générations à venir

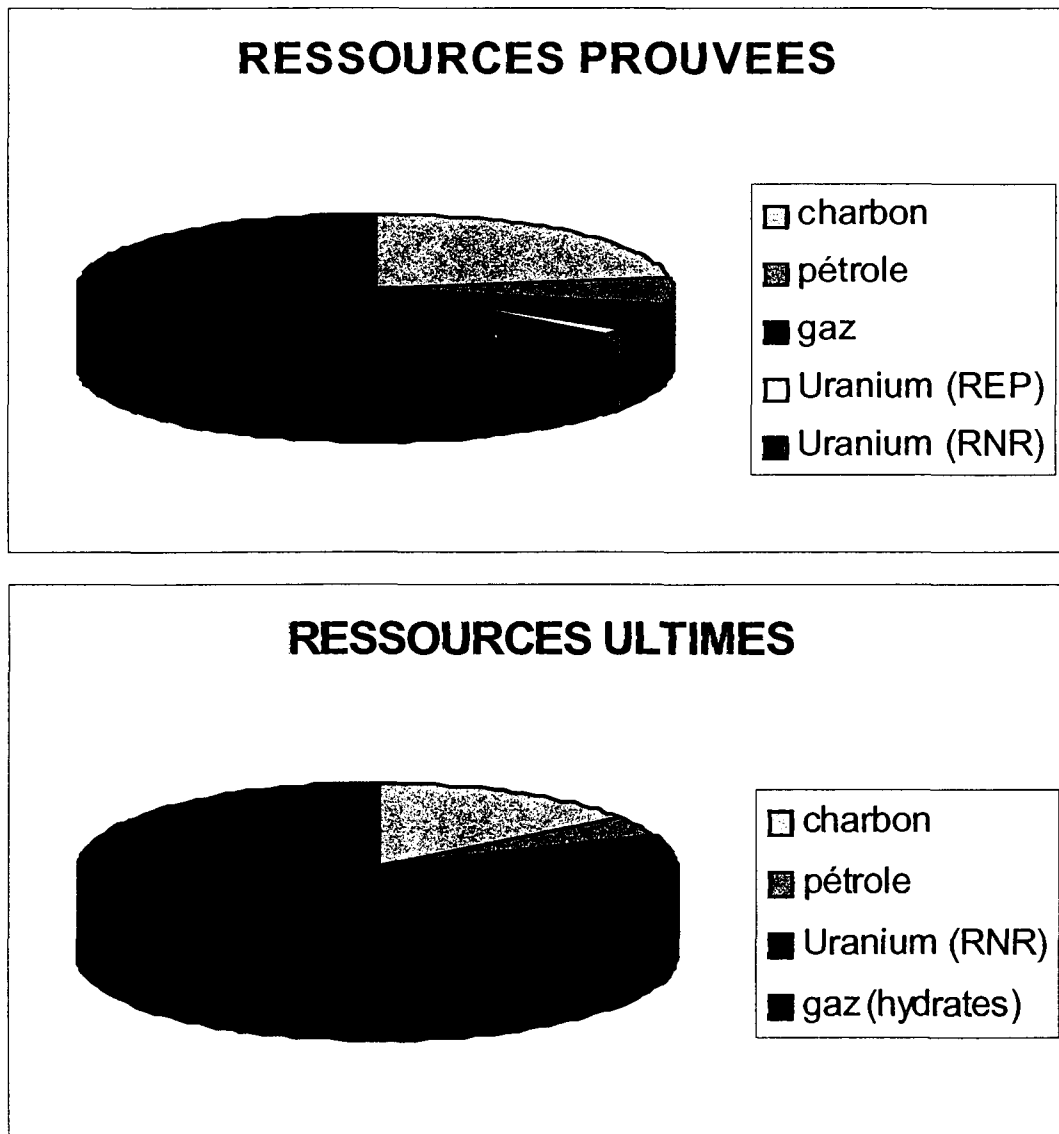


Fig.2 : Répartition des réserves mondiales en énergies non-renouvelables en pourcentage des réserves totales [5-10]

Cette approche rationnelle inclut l'amélioration des rendements des systèmes de production et d'utilisation de l'énergie, l'arrêt des gaspillages et une utilisation optimale des diverses sources d'énergie en fonction de leurs atouts respectifs. En outre, il est nécessaire de maintenir une recherche de pointe afin d'être en mesure

de mobiliser pour le futur de nouveaux systèmes énergétiques et de nouvelles sources d'énergie.

3. RISQUE CLIMATIQUE ET NOUVELLE DONNE ENERGETIQUE

Bien que connue depuis plus d'un siècle [11], la possibilité du réchauffement climatique lié à la combustion des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz, bois...) ne fait l'objet d'une attention particulière que depuis une dizaine d'années seulement, c'est-à-dire depuis que les scientifiques ont mis en évidence les premiers effets tangibles de ce réchauffement (fig.3) et ont alerté l'opinion et les gouvernements sur les risques de dérèglement climatique [12].

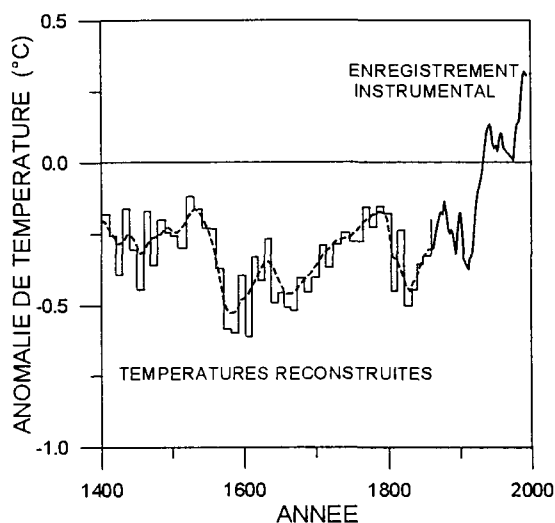


Fig.3a: Température moyenne du globe (période 1400-2000) [12]

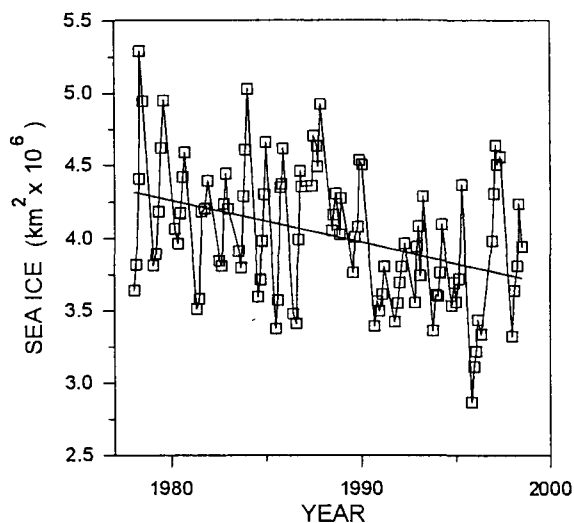


Fig.3b: Evolution de la surface de la banquise arctique (1975-2000) [13]

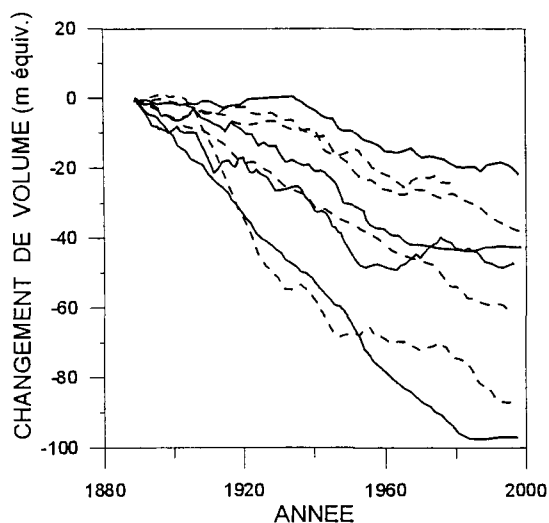


Fig.3c: Evolution du volume des glaciers de différentes zones géographiques [14] (données relatives à 1890 en hauteur d'eau équivalente).

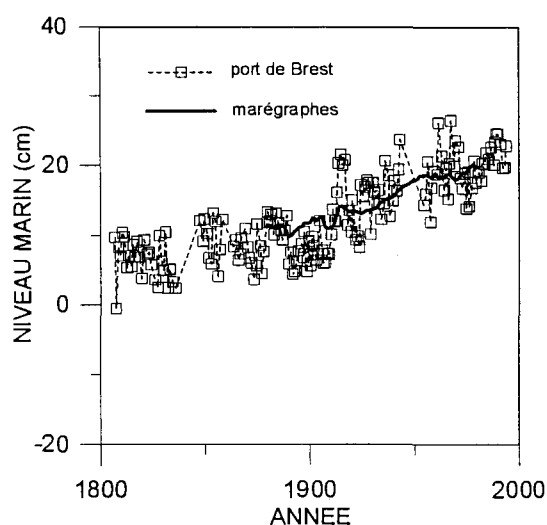


Fig.3d: Augmentation du niveau des mers (période 1800-2000) [12]

La question du réchauffement planétaire est donc désormais un élément majeur et incontournable de la politique énergétique mondiale. Actuellement, environ 28 milliards de tonnes de CO₂ sont rejetées dans l'air annuellement, dont 22 milliards liés aux combustibles fossiles [12], provoquant une augmentation rapide et inquiétante de sa concentration dans l'atmosphère (fig.4).

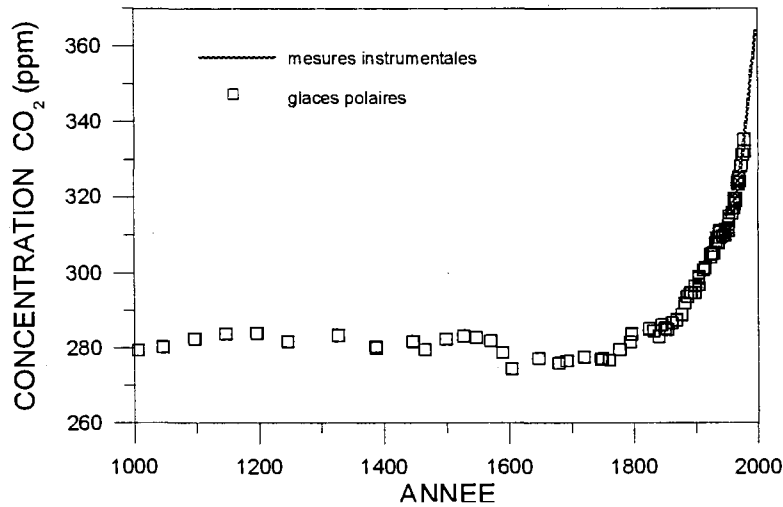


Fig.4: Evolution de la teneur atmosphérique en CO₂ [15-16]

La convention des Nations Unies sur le changement climatique, signée en 1992, puis la conférence de Kyoto (décembre 1997) marquent un premier pas vers une volonté internationale de limiter les rejets de gaz à effet de serre (notamment CO₂, CH₄ et N₂O). Néanmoins, la mise en place d'un accord international de limitation des rejets est une affaire complexe, comportant des implications géopolitiques et économiques majeures, quand on sait que:

- les besoins énergétiques mondiaux augmentent continuellement, tirés par la croissance, la démographie et l'essor économique du Tiers-Monde (fig.5).

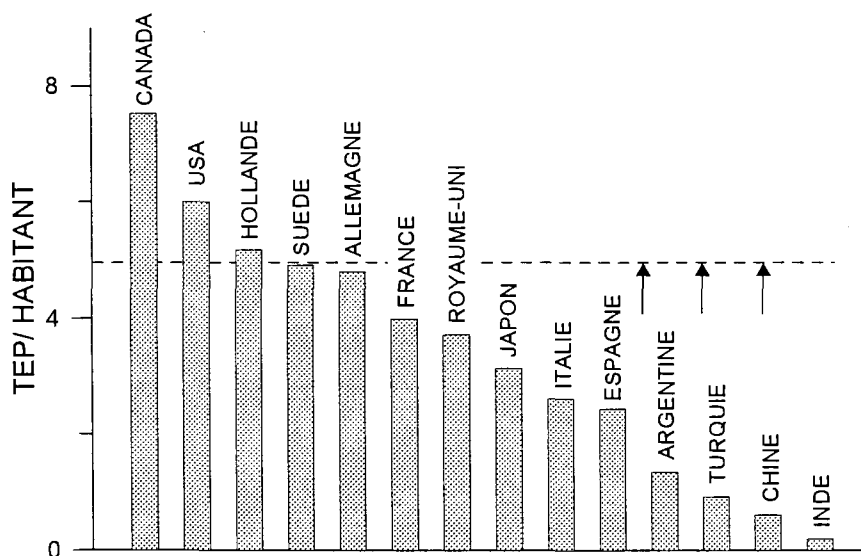


Fig.5: Disparité actuelle de la consommation énergétique par habitant selon les pays [17]

- 85 à 90% de ces besoins [2] sont actuellement assurés par du combustible fossile (charbon, gaz, pétrole) générateur de CO₂.
- les prévisions de rejets de CO₂, si rien n'est fait pour les limiter, dépasseront les 50 milliards de tonnes/an en 2050, soit un doublement par rapport à aujourd'hui (scénario IS92a « Business As Usual » de l'IPCC [12]).
- une stabilisation de la teneur atmosphérique en CO₂ autour de 550 ppm (objectif considéré comme acceptable par les scientifiques) nécessitera au contraire une diminution des rejets environ d'un facteur deux [12] par rapport au niveau actuel (fig.6).

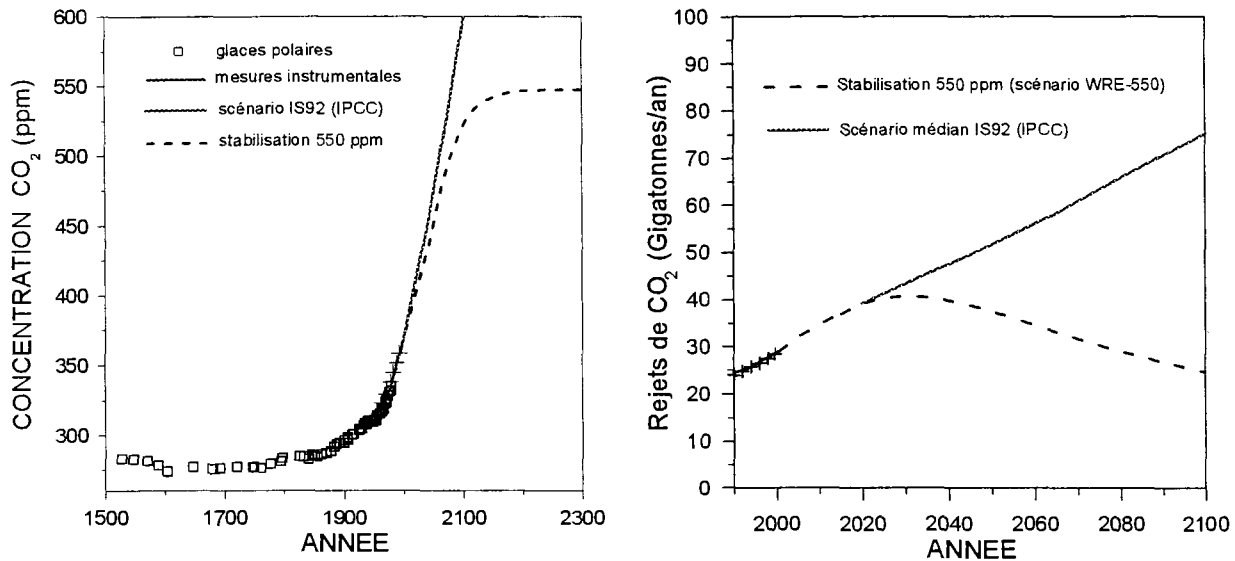


Fig.6: Scénarios "Business as usual" (IPCC IS92 [12]) et stabilisation à 550 ppm (IPCC WRE-550 [18]).

Pour relever ce défi planétaire, il existe des solutions. Celles-ci s'appuient sur trois leviers principaux :

- 1- La maîtrise de l'énergie : amélioration des rendements énergétiques et utilisation rationnelle de l'énergie.
- 2- La gestion du cycle du carbone ("Carbon Management") : développement des techniques de capture et de stockage géologique des rejets de CO₂ [19]
- 3- L'évolution du mixte énergétique : remplacement des combustibles à fort teneur en carbone (charbon, pétrole) par des combustibles hydrogénés à teneur en carbone réduite (gaz naturel), recours accru aux énergies non-émettrices de CO₂ telles que hydraulique, nucléaire, éolien, biomasse ou solaire....

3.1- LA MAITRISE DE L'ENERGIE

L'accès du plus grand nombre à l'énergie, facteur de confort et de qualité de vie, est un droit citoyen. La limitation de la consommation énergétique par le rationnement ou par la hausse des prix (rationnement par l'argent) se heurte donc à un problème d'acceptabilité sociale (voir l'impopularité des hausses de prix des

carburants). Toutefois, cela ne signifie pas loin s'en faut qu'il soit impossible de faire des économies d'énergie. Des gisements importants existent encore à l'heure actuelle dans l'amélioration des performances des appareils de grande consommation (électroménager, éclairage, ...), des transports routiers, de l'isolation thermique des bâtiments. L'expérience des quinze dernières années nous a montré cependant qu'une fois le choc pétrolier oublié, nos concitoyens ne font pas spontanément de la « chasse au gaspi » leur activité favorite. L'introduction de nouvelles normes auprès des constructeurs en matière de consommation énergétique de leurs produits semble donc la voie la plus efficace pour obtenir des résultats quantifiables. Selon l'ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie), le développement de technologies plus performantes permet d'envisager en 2050 une baisse des consommations en France de 5 TWh/an pour le parc d'équipement ménager, 8 TWh/an pour les équipements de lavage et 10 TWh/an pour l'éclairage, soit un total de 23 TWh, chiffre à rapprocher des 513 TWh de production électrique brute annuelle en France. Des économies équivalentes sont attendues dans le secteur tertiaire sur les postes éclairage, chauffage, climatisation, ainsi que dans le secteur industriel, à partir de l'amélioration des procédés de fabrication. A l'autre bout de la chaîne, le recours à des procédés de production d'énergie plus performants et le développement de la cogénération (production d'électricité et récupération de la chaleur) constituent également un gisement d'économies non négligeable (fig.7).

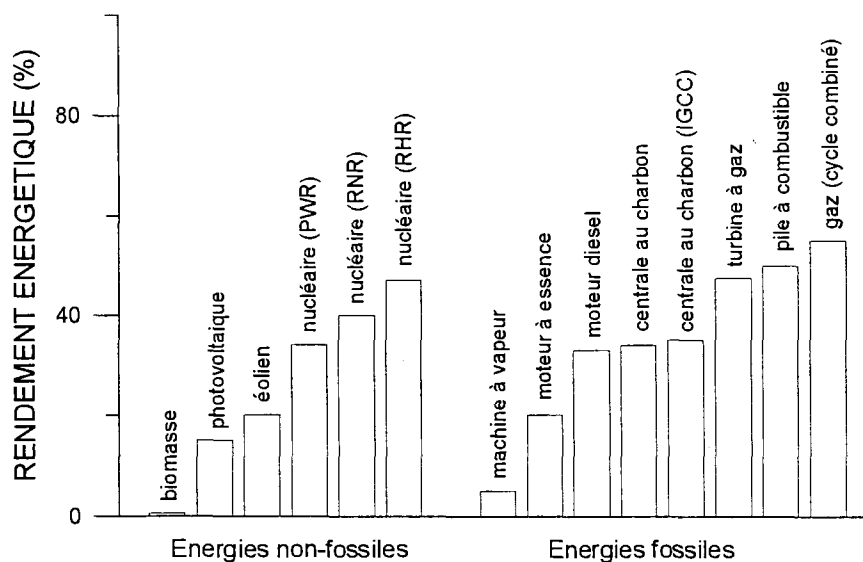


Fig.7: Rendement de différents systèmes de conversion d'énergie [20,21]

Néanmoins, en matière d'économies d'énergie, l'expérience montre qu'il est difficile de faire des prévisions fiables. Il faut donc se garder de tout excès d'optimisme. En effet, l'efficacité économique et énergétique engendrent de la croissance et donc de nouveaux besoins : acquisition de nouveaux équipements par les ménages, augmentation des transports liés aux loisirs, etc..., qui peuvent annuler tout ou partie des gains obtenus (fig.8).

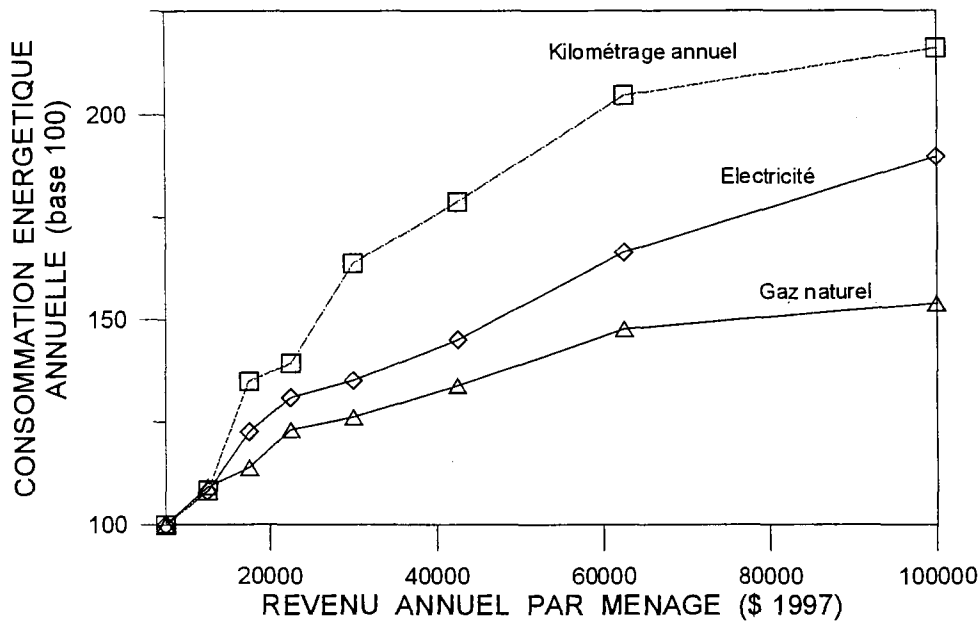


Fig.8: Consommation énergétique des ménages US en fonction de leurs revenus [22]

Ces deux tendances inverses d'amélioration de l'efficacité énergétique d'une part, et de dynamique industrielle d'autre part, laquelle pousse à la mise sur le marché de nouveaux équipements et services, expliquent pourquoi, y compris dans les pays développés comme la France, tous les scénarios prévoient une augmentation de la consommation énergétique (fig.9).

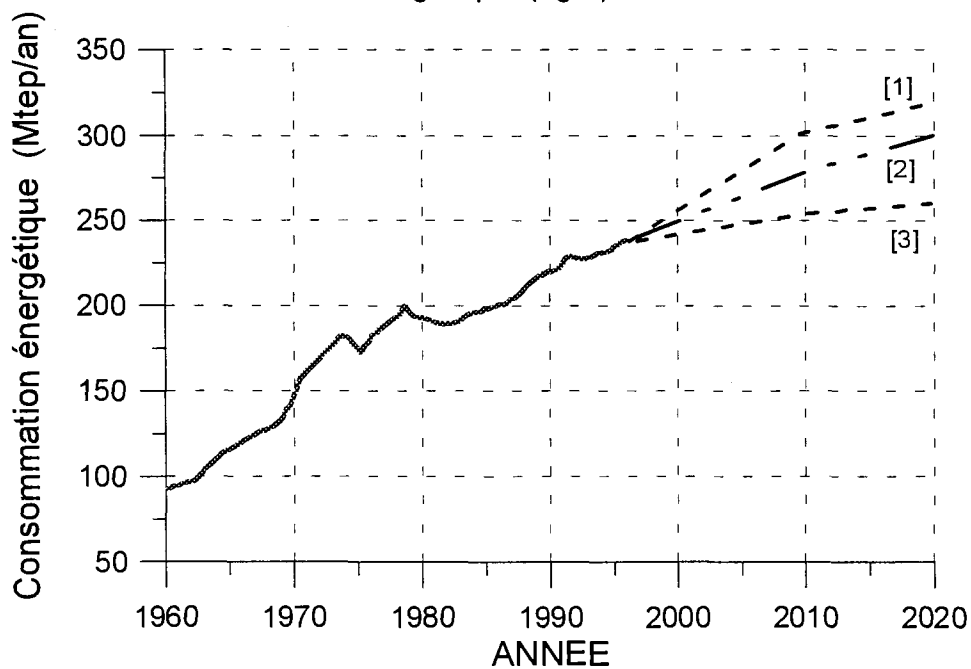


Fig. 9: Consommation énergétique en France et scénarios d'évolution jusqu'à 2020 [8]. Les trajectoires (1) à (3) correspondent à des scénarios allant du libéralisme économique à l'écologie.

3.2- LA GESTION DU CYCLE DU CARBONE

Capture et séquestration du CO₂

Dans la plupart des pays industrialisés, les industries sont soumises à des normes strictes en matière de rejets et de gestion des déchets. Paradoxalement, le secteur de l'énergie fossile échappe à cette règle de base en ce qui concerne le CO₂, lequel est rejeté en totalité dans l'environnement. Inciter les grandes industries (centrales au charbon, au fioul ou au gaz, cimenteries, ...), qui représentent environ 30% des émissions mondiales de CO₂ [23], à mettre en place des systèmes de récupération, de la même manière qu'elles ont dû le faire par le passé pour les rejets soufrés, constituerait donc une solution à la fois logique et efficace. Les dispositifs techniques existent et sont d'ailleurs employés à petite échelle (1000 tonnes de CO₂ /jour dans les unités les plus grandes) pour la production de CO₂ à usage industriel. La capture consiste soit à décarboniser le combustible en entrée d'installation (réaction avec la vapeur d'eau conduisant à la production d'hydrogène et de CO₂), soit à récupérer le CO₂ dans les effluents en sortie d'installation. Quelque soit l'option retenue (pré-traitement ou post-traitement), les techniques qui permettent la récupération du CO₂ sont basées sur des méthodes d'adsorption physique ou chimique couplées éventuellement à un processus de séparation gazeuse par membranes.

Le coût moyen de capture du CO₂ est évalué actuellement entre 25 et 50 \$/tonne de CO₂ selon le type d'installations [24,25], avec un objectif de 10 \$/tonne de CO₂ fixé par le DOE américain. Le problème de l'entreposage à long terme du CO₂ ainsi récupéré (sous forme de gaz liquéfié) est plus complexe, compte-tenu des volumes énormes mis en jeu. Les solutions les plus satisfaisantes sur le plan environnemental sont le transport du CO₂ par pipe-lines et son injection dans des formations géologiques profondes du type réservoirs gaziers ou champs pétroliers épuisés ou en voie d'épuisement (fig.10). Le potentiel de stockage au niveau mondial est de l'ordre de 10,000 milliards de tonnes de CO₂ [26] soit l'équivalent de plusieurs centaines d'années de rejets cumulés de CO₂ (tableau 1)

Réservoir	Capacités mondiales (Gtonnes CO₂)
Aquifères salins profonds	300 - 10000
Anciens gisement gaziers et pétroliers	650 - 1800
Océan profond	> 5000
Mines	> 15

Tableau 1 : Capacités mondiales prévisionnelles de stockage du CO₂

Vingt millions de tonnes/an de CO₂ sont d'ores et déjà injectés dans les champs pétrolifères américains [27] pour l'amélioration des rendements de récupération du pétrole (Enhanced Oil Recovery). En mer du Nord également, le CO₂ contenu naturellement dans le gaz extrait du Sleipner West Field (exploité par la compagnie norvégienne Statoil) est séparé puis réinjecté dans un aquifère à 1000 mètres sous la surface. Un million de tonnes de CO₂ sont ainsi entreposés chaque année en profondeur [28]. Le coût transport/stockage profond est estimé autour de 10\$/tonne de CO₂ [26]. Au total, la capture et le stockage du CO₂ se traduirait par un surcoût de l'ordre de 2 à 3 UScents/KWh [24], pour une efficacité de piégeage de l'ordre de 80% à 90%.

Un développement des technologies de piégeage du CO₂ en direction des grands centres de production d'énergie fossile (centrales, industries lourdes) représente donc un potentiel important en terme de diminution des rejets, de l'ordre de plusieurs milliards de tonnes de CO₂/an.

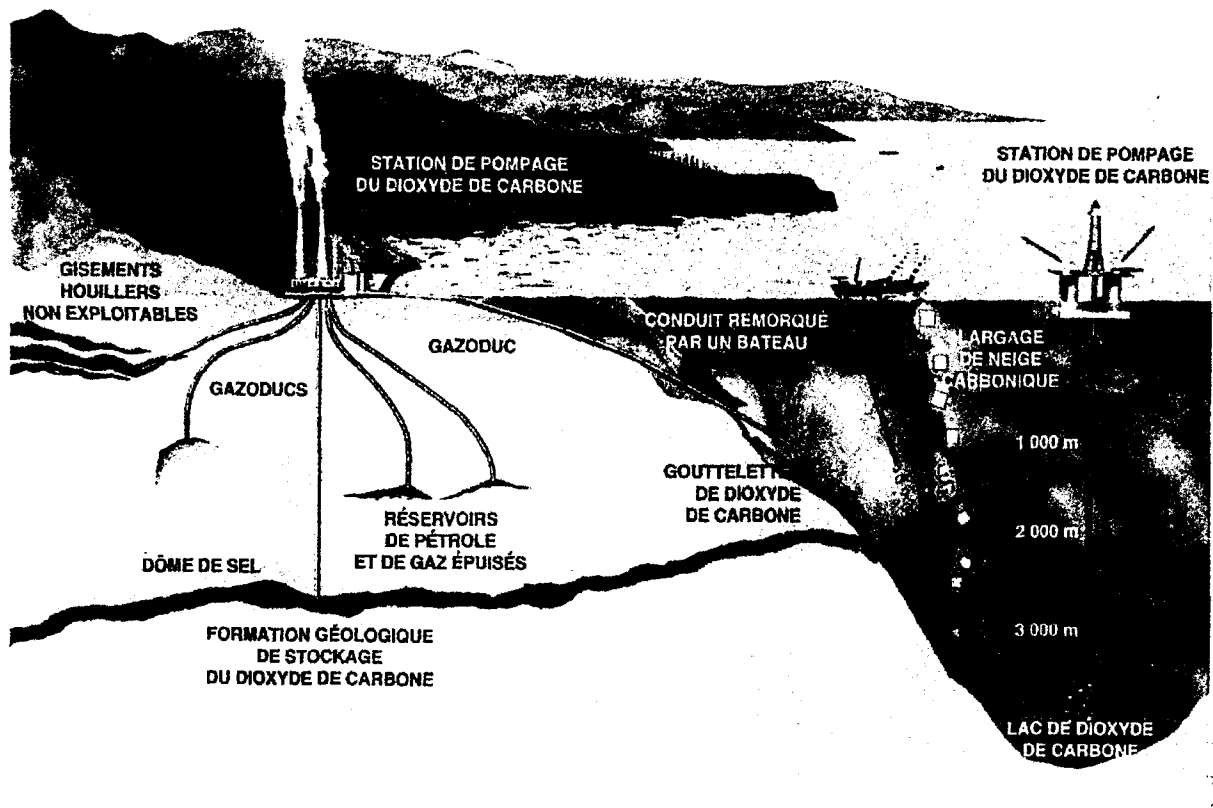


Fig.10. Options de stockage du CO₂

Piégeage naturel du CO₂

Les écosystèmes participent naturellement au piégeage du CO₂. Sur les 28 milliards de tonnes émises chaque année, seulement la moitié reste dans l'atmosphère. L'autre moitié est absorbée, à part à peu près égale, par l'océan et la végétation terrestre [12]. Un moyen de réduire l'impact des rejets de CO₂ consisterait donc à favoriser ces puits naturels de CO₂, en particulier par la reforestation et le changement des pratiques agricoles. Pour l'instant, c'est au contraire la déforestation

qui se poursuit au rythme de 1.6% par an en moyenne mondiale (2% pour les forêts tropicales [29]), responsable de l'émission de 6 ± 3 milliards de tonnes de CO_2 /an [12]. Un arrêt, voire une inversion de ce phénomène aurait donc un effet très significatif sur le bilan des émissions. D'autre part, la conversion des terres vierges en terres agricoles a engendré dans le passé un déstockage du carbone initialement enfoui dans les sols de l'ordre de 120 tonnes de CO_2 /ha, correspondant à un flux cumulé de l'ordre de 200 milliards de tonnes [30,31]. Les scientifiques estiment que l'optimisation des pratiques agricoles serait susceptible de restaurer environ 50% de ce stock de carbone, soit 60 tonnes de CO_2 /ha [30-32]. En supposant une durée caractéristique de 50 ans pour la reconstitution de ce stock, le chiffre précédent correspondrait à un puits de carbone moyen de 2 milliards de tonnes de CO_2 /an sur cette période [33]. Au total, l'ensemble des activités de séquestration du carbone dans les écosystèmes naturels (forêts, sols agricoles, etc...) pourrait stocker jusqu'à 250 Gt CO_2 sur les 50 prochaines années [30].

On voit qu'une gestion optimisée des capacités naturelles des écosystèmes à stocker le carbone peut jouer un rôle significatif dans la lutte contre l'effet de serre. Néanmoins, les flux de carbone ainsi générés sont transitoires et s'annulent dès que l'écosystème atteint son nouvel état d'équilibre. La séquestration du carbone permet donc simplement de gagner du temps. Il faut également rappeler que les puits de carbone que l'on peut créer dans la biosphère continentale sont réversibles : une fois le carbone stocké, il faut donc prendre les mesures appropriées pour en assurer la conservation à long terme.

D'autre part, la modélisation de l'évolution future des flux naturels de carbone indique un affaiblissement progressif de l'efficacité des puits naturels de carbone (océan, biosphère continentale), dû à plusieurs phénomènes :

- l'augmentation de la respiration des sols [34] et le ralentissement de la ventilation de l'océan (effet de stratification), liés au réchauffement climatique [35].
- la diminution du déséquilibre en CO_2 entre l'atmosphère et les réservoirs de carbone terrestre et océanique, dans l'hypothèse d'un effort de stabilisation de la teneur en CO_2 atmosphérique.

Le changement des pratiques agricoles, bénéfiques vis-à-vis du stockage du CO_2 peut aussi se révéler négatif sur le plan des autres gaz à effet de serre (N_2O , CH_4) [36]. De même, le développement des forêts boréales peut également avoir un effet d'albedo tendant à augmenter le réchauffement climatique [37].

Au total, il se peut donc fort bien que les efforts de reconstitution des stocks biosphériques de carbone puissent être annulés par une évolution inverse des puits naturels de carbone et par certains effets adverses liés à des rétroactions climatiques.

3.3 - L'EVOLUTION DU MIXTE ENERGETIQUE

Les mesures décrites ci-dessus (économies d'énergie, capture/stockage du CO_2 , séquestration du carbone dans les écosystèmes naturels) ne sont pas capables à elles seules d'infléchir de manière suffisante la courbe des émissions nécessaire à une stabilisation du CO_2 à 550 ppm (scénario IPCC WRE-550 [18]).

En complément des mesures précédentes, une modification importante du mixte énergétique, actuellement constitué à près de 90% par les énergies fossiles,

doit donc être opérée, avec un recours accru aux énergies à faible teneur en carbone (gaz naturel,...) et plus encore aux énergies non-émettrices de CO₂. Ces changements sont possibles, sur des périodes relativement courtes. Un exemple éloquent est celui de la France. En sept ans (1979-1986) la part des combustibles fossiles dans le bilan énergétique français a ainsi été ramené de 87% à 63% (fig.11). Actuellement, la production énergétique du parc électronucléaire français s'élève à quelque 100 Mtep [38,39] (dont 15% à l'exportation), soit l'équivalent de la production pétrolière annuelle du Koweït.

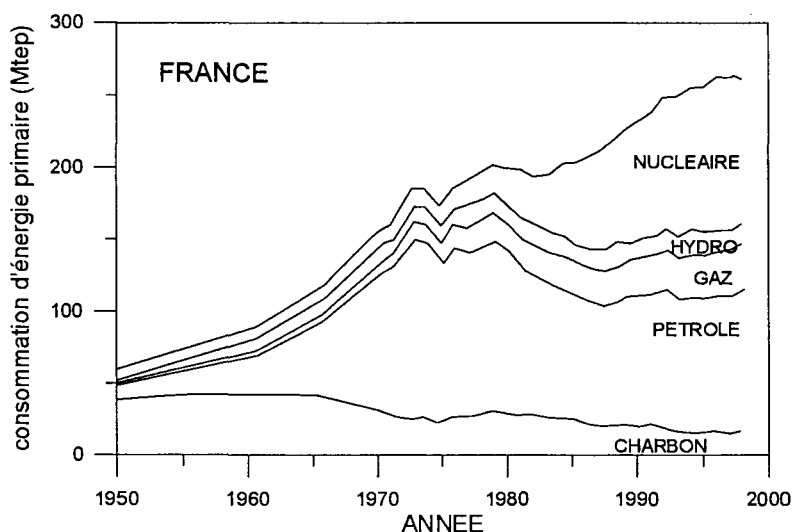


Fig.11: Evolution du mixte énergétique français

Sur la période concernée, les émissions de CO₂ ont été réduite de 27% (fig.12), plaçant la France aux premiers rangs en Europe (fig.13).

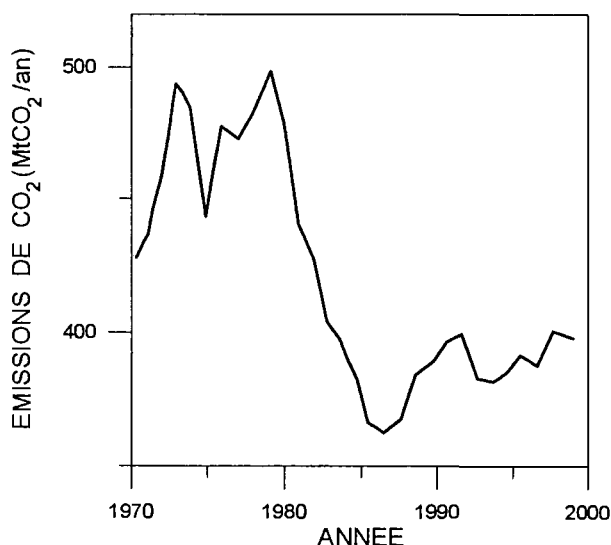


Fig.12: Evolution des émissions françaises de CO₂ fossile (1970-1999) [2]

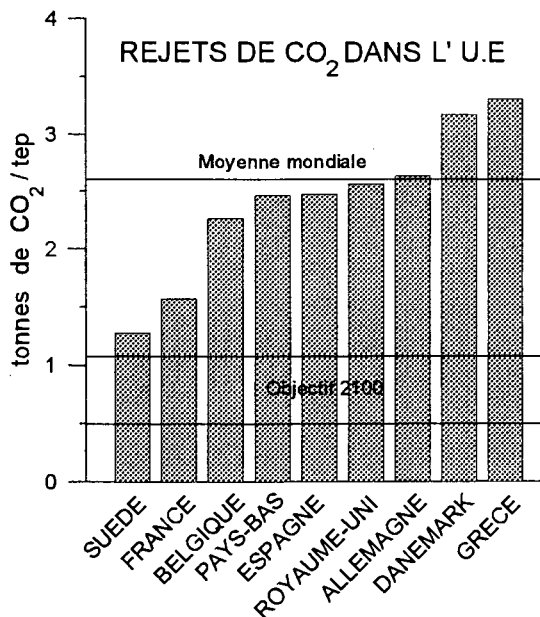


Fig.13: Rejets de CO₂ dans l'Union Européenne [2] et objectif à atteindre pour une stabilisation à 550 ppm

L'objectif de ces modifications du mixte énergétique mondial est de réduire le ratio actuel de CO₂ émis par unité d'énergie produite (2.6 tonnes de CO₂ par tonne d'équivalent pétrole) à 0.5-1.1 tCO₂/tep à l'horizon 2100 (fig.13), afin de garantir les besoins mondiaux en énergie [40] tout en stabilisant la teneur atmosphérique en CO₂ autour de 550 ppm. Pour chaque pays, le choix entre les différentes énergies disponibles est fortement influencé par les contraintes physiques propres à chaque type de ressource (potentiel hydraulique, existence de sites éoliens à vitesse moyenne de vent suffisante, ensoleillement moyen élevé, etc...). Chaque énergie possède donc une niche spécifique pour laquelle ses atouts sont valorisés de manière optimale (tableau 2), cette optimisation faisant intervenir, en plus des critères techniques, des critères économiques et sociaux (tableau 3) :

- compétitivité économique (coût du kWh)
- sensibilité au prix des matières premières (gaz, uranium,...)
- impact sur l'emploi / valeur ajoutée
- impact environnemental
- acceptabilité sociale

Puissance fournie	Sources d'énergie	Applications
Fortes puissances 100-1500 MW	Grande hydraulique Nucléaire	Industries Zones urbanisées
Moyennes puissances 10 - 100 MW	Petite hydraulique Géothermie haute température	Petites industries Habitations Tertiaire
Faibles puissances 0.01 - 10MW	Micro-hydraulique Eolien Biomasse Solaire Géothermie basse température	Habitations Tertiaire

Tableau 2: Classement des sources d'énergies non-émettrices de CO₂
en fonction de la puissance fournie

Energies	1 Capacité à faire face à la demande future en énergie	2 Compétitivité économique (prix du KWh)	3 Sensibilité au prix des matières premières	4 Impact sur l'emploi / valeur ajoutée	5 Impact sur l'environnement, y compris le climat	6 Acceptabilité sociale	Total sur 30
Hydraulique	3	5	5	2	4	4	23
Nucléaire	4	4	4	5	3	2	22
Eolien	3	2	5	4	4	3	21
Gaz naturel	4	4	1	2*	3	5	19
Pétrole	3	2	1	4*	2	5	17
Charbon	4	3	2	2*	1	3	15

** pour les pays non-producteurs*

Tableau 3 : Performances des principales sources d'énergie vis-à-vis de six critères économiques, sociaux et environnementaux (classement 1=mauvais, 2=plutôt mauvais, 3= acceptable, 4=plutôt bon, 5=bon)

3.3.1 Les atouts actuels du gaz naturel

Le gaz contribue actuellement à hauteur de 28% à la production d'énergie primaire mondiale [41]. Les progrès obtenus sur le coût et les performances des turbines à gaz, les cours actuels particulièrement bas et les réserves mondiales importantes font du gaz naturel une source d'énergie en fort développement. Néanmoins, même si le taux de CO₂ émis par KWh produit est favorable (360-500 gCO₂/KWh) comparé au charbon (600-1000 gCO₂/KWh), il n'en reste pas moins que vis-à-vis de l'effet de serre, le gaz n'est pas sans impact environnemental et que son emploi généralisé impliquerait forcément des rejets massifs de CO₂. Un recours exagéré au gaz poserait également un certain nombre de difficultés vis-à-vis des critères économiques (sensibilité au prix du gaz /balance commerciale) pour les pays démunis de réserves sur leur sol, sachant que le prix du gaz entre pour plus des deux tiers dans le coût du KWh [42].

3.3.2 Le développement des énergies non-fossiles

L' énergie Nucléaire

Hormis l'énergie hydraulique, l'énergie nucléaire est à l'heure actuelle la seule technologie disponible de production intensive d'énergie sans CO₂. En France, le remplacement du nucléaire par le gaz conduirait à une augmentation de nos rejets en CO₂ de l'ordre de 40 à 50% (150 à 200 millions de tonnes de CO₂ supplémentaires par an, soit l'équivalent des rejets d'un parc de 40 millions de véhicules), nous entraînant par la même très loin de nos engagements de limitation signés à Kyoto, qui prévoient une stabilisation de nos rejets de CO₂ au niveau de l'année 1990. Le rapport Charpin-Dessus Pellat [21], remis au Premier Ministre en Juillet 2000, montre d'ailleurs très clairement qu'à l'horizon 2050, seuls les scénarios s'appuyant sur une continuité de la production électronucléaire (scénarios H3 et B3), avec un renouvellement du parc existant à l'horizon 2020, permettent de contenir le dérapage vis-à-vis des critères de Kyoto (fig.14).

Au niveau mondial, bien que son utilisation ne concerne qu'un nombre limité de pays, l'énergie nucléaire, avec 627Mtep annuels (2430 TWh/an [39]), évite 2 milliards de tonnes de CO₂/an. Si l'on extrapole la situation française à l'ensemble des pays industrialisés, ce n'est plus 2 mais 8.8 milliards de tonnes de rejets de CO₂ qui pourraient ainsi être évités, soit environ le tiers des rejets actuels de CO₂.

Le nucléaire constitue donc l'une des pièces maîtresses du dispositif de ré-équilibrage du mixte énergétique vers les énergies sans CO₂. Actuellement réservée à la seule production électrique industrielle et domestique, l'énergie nucléaire a également dans le futur l'opportunité de renforcer son rôle dans la lutte contre l'effet de serre par de nouvelles applications dans le secteur des transports, qui représente à lui seul environ 30% des émissions mondiales de CO₂ [41] (35% en France [43]):

- voiture électrique dans les villes, hautement bénéfique pour la qualité de l'air.
- production d'hydrogène par les centrales nucléaires existantes pendant les périodes creuses (suppression de la gestion de réseau), ou par cracking de l'eau ($H_2O \rightarrow H_2 + 1/2 O_2$) dans des réacteurs nucléaires de haute température, pour les futures piles à combustibles.

- valorisation du CO₂ capturé en sortie des centrales à charbon ou à gaz par hydrogénation et production de carburants "verts" (éthanol - C₂H₅OH ou méthanol - CH₃OH) par hydrogénation du CO₂ [44-47] (réactions du type $\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O}$).

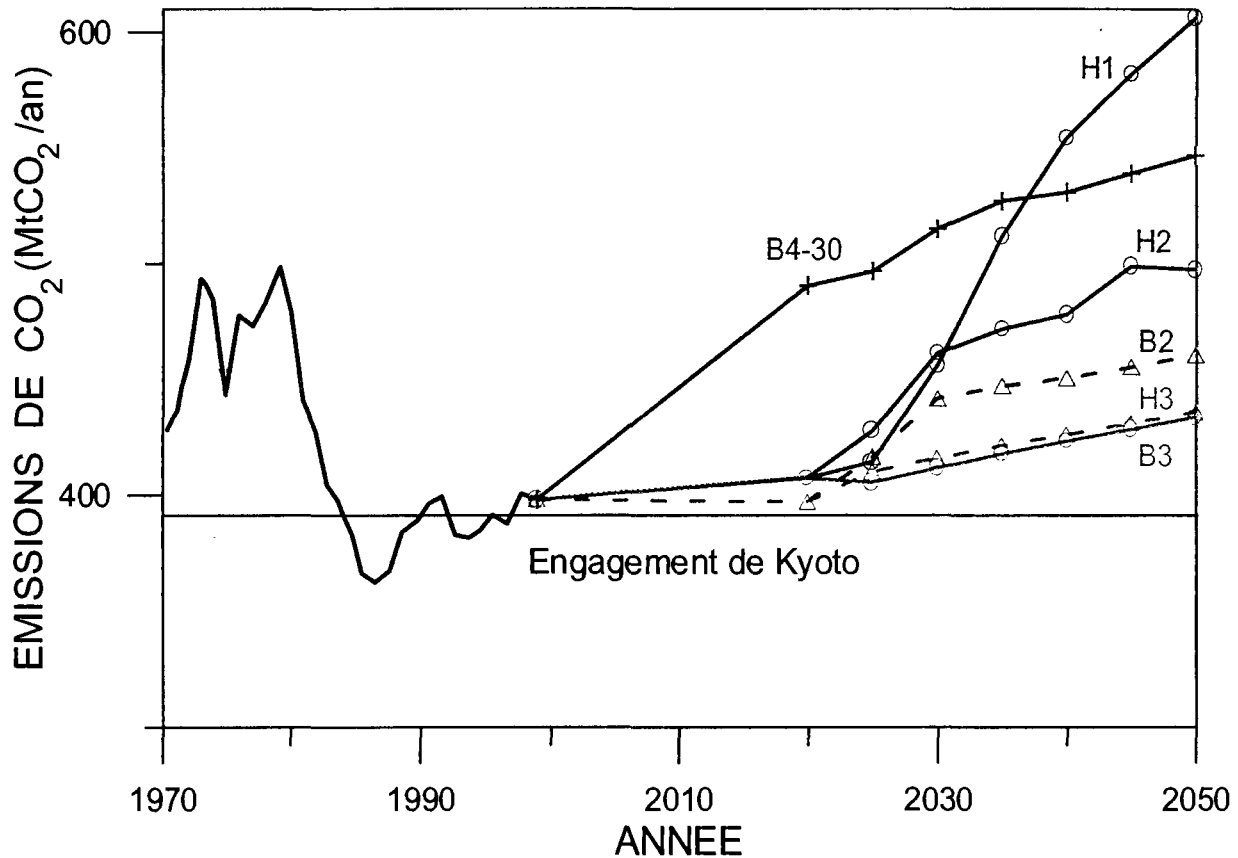


Fig.14: Evolution des rejets de CO₂ en France à l'horizon 2050 selon les différents scénarios énergétiques envisagés par le rapport Charpin [21]. Les scénarios H correspondent à une demande énergétique haute tandis que les scénarios B supposent une croissance moins forte de la demande. H1 correspond à une logique de marché sans contrainte particulière, avec abandon progressif du nucléaire. H2 et H3 supposent, outre le développement des énergies renouvelables, le maintien de la production électronucléaire au niveau actuel (H2) ou son augmentation (H3) pour répondre à l'augmentation de la demande énergétique. B2 correspond à un repli modeste de la production électronucléaire (compensée par le gaz et l'éolien) tandis que B3 suppose un maintien de l'électronucléaire au niveau actuel avec un effort accru de développement de l'éolien. B4-30 décrit une sortie anticipée du nucléaire. Dans tous les scénarios, on notera bien évidemment l'influence prépondérante des choix concernant l'avenir du parc électronucléaire sur les rejets de CO₂. (NB. Ces émissions de CO₂ doivent être considérées comme des valeurs par défaut car elles ne concernent que la production électrique et ne prennent pas en compte en particulier la croissance prévisible du secteur des transports, responsable à lui seul de 35% des rejets [43])

Cette nouvelle méthode de production de carburants auraient des avantages substantiels en terme environnemental et économique :

- diminution de la part des transports dans l'effet de serre, par recyclage et valorisation du CO₂,
- évitement du coût de stockage du CO₂,
- préservation des réserves mondiales de pétrole,
- diversification des zones d'approvisionnement en carburants avec, comme corollaire, une meilleure stabilité des prix.

Toutefois, malgré ses réalisations et son bilan, l'industrie nucléaire mondiale souffre actuellement d'un sérieux déficit d'image dans l'opinion publique de nombreux pays. Ce déficit est en grande partie imputable au contre-exemple soviétique, qui a conduit à l'accident nucléaire majeur de Tchernobyl : concepts de réacteurs peu sûrs, technologies rustiques, absence de culture de sûreté, et gestion irresponsable.

Malgré une situation radicalement différente dans les pays occidentaux, la confiance du public dans la sûreté de la filière électronucléaire s'est néanmoins éteinte. Cette mauvaise image de marque a également été renforcée par le déficit important de transparence et de communication des autorités lors de la crise de Tchernobyl et du passage du panache radioactif au-dessus de l'Europe de l'Ouest. Ce déficit de communication, qui ne se comble que lentement, a renforcé la méfiance vis-à-vis de cette industrie considérée par une frange significative du public comme dangereuse.

L'industrie nucléaire est actuellement sur un palier (fig.15), avec un nombre extrêmement limité de nouvelles mises en chantier, et une rentabilisation maximale du parc existant. Les concepts et la technologie nucléaire actuels sont largement issus de la période de son essor industriel des années 70-80. Il est clair que la nouvelle génération de centrales, à l'horizon 2020-2030, ne pourra être une simple extrapolation des concepts existants, mais devra bénéficier, au même titre que n'importe quelle autre industrie de pointe, des avancées technologiques :

Avancées en terme de :

- sûreté passive (voir par exemple le concept de réacteur intrinsèquement sûrs, AP600, développé par Westinghouse [49] et l'EPR développé en Europe),
- réduction des déchets (concept de réacteur "omnivore", capable de brûler ses propres déchets),
- rendement électrique (Réacteurs Haute Température),
- compétitivité économique, etc...

S'il veut être en mesure de tenir toute sa place dans la lutte contre l'effet de serre, le secteur nucléaire doit donc s'attacher à regagner la confiance de l'opinion, par une plus grande transparence, une plus grande écoute du public, et continuer de progresser dans le domaine technologique.

Parmi les énergies renouvelables, l'électricité d'origine hydraulique reste la plus largement exploitée dans le monde : 2500TWh en 1996 [2] soit 19% de la production mondiale d'électricité, avec des pics particulièrement élevés pour des pays favorisés sur le plan hydraulique : Norvège 85%, Brésil 82%. La production d'origine hydraulique continue de progresser régulièrement, principalement dans les pays en développement, avec un potentiel exploitable global de 9000 TWh [50], correspondant à 7.4 Gigatonnes de CO₂ évitées par an.

L'énergie éolienne, grâce aux progrès importants dans la technologie des aérogénérateurs, est celle qui se développe au rythme le plus soutenu [51]: 4TWh en 1990, 20TWh en 1998, avec un potentiel qui pourrait être comparable à celui de l'hydraulique selon certaines estimations [52]. Malgré son faible facteur de production (Puissance moyenne/Puissance installée = environ 20% [50]) lié au caractère intermittent de la source d'énergie (fig.17), la rentabilité économique est en constante amélioration et on peut considérer que les projets actuellement subventionnés se rapprochent du seuil de compétitivité.

Ceci est encore loin d'être le cas, sauf applications particulières, pour l'énergie solaire (0.25\$/KWh [53]) qui restera pour un bon moment encore une énergie d'appoint. Certaines applications (chauffe-eau solaire) ont néanmoins un potentiel important dans les pays où l'ensoleillement est favorable.

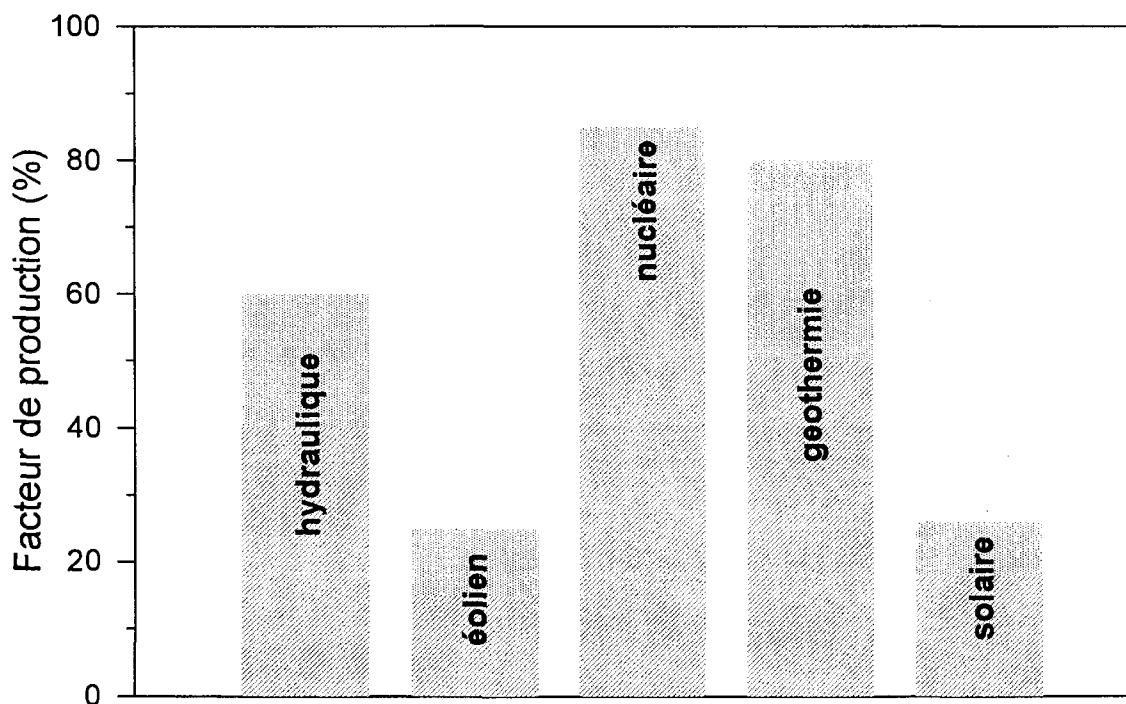


Fig.17: Coefficient de production des diverses énergies non-fossiles [50].
Le faible coefficient pour le vent et le soleil s'explique par le caractère intermittent de la source.

La géothermie de basse énergie est exploitée dans de nombreux pays pour la production de chaleur (réseau de chauffage urbain), avec une puissance installée d'environ 10000 MW thermique [54]. En France, les problèmes techniques

(problèmes de corrosion et de colmatage) et surtout économiques de la filière ont fortement ralenti l'engouement initial pour cette énergie dans la période qui a suivi le choc pétrolier. Les pompes à chaleur géothermiques connaissent néanmoins un développement significatif en Amérique du Nord et en Europe pour le chauffage des logements et des bâtiments [54]. La géothermie de haute énergie, limitée à un nombre restreint de pays situés en zones volcaniques, est en progression de 4.6% par an depuis 1990. Néanmoins, son poids global reste marginal, avec une production électrique évaluée à environ 50 TWh/an [54].

La biomasse moderne, c'est-à-dire celle exploitée selon des critères environnementaux stricts (sinon la combustion de la biomasse s'apparente à de la déforestation et constitue une source supplémentaire de CO₂ pour l'atmosphère), connaît également un développement notable : la production mondiale de biogaz, 15 Mtep/an, a un potentiel évalué entre 150 et 300 Mtep/an [55] (à comparer à la consommation mondiale de gaz en 1998: 2016 Mtep [2]). La combustion de biomasse pour la production électrique connaît une croissance relativement forte en Europe depuis 1990 avec 1.7% de la production électrique en 1996 [56].

Néanmoins, face aux questions environnementales sérieuses liées à l'agriculture industrielle, et compte-tenu du très faible rendement énergétique de la biomasse (fig.7), l'engouement actuel pour les bio-énergies ne doit pas faire perdre de vue la nécessité d'une évaluation minutieuse des procédés de fabrication. A titre d'exemple, une étude critique des chiffres publiés aux Etats-Unis [57] pour la fabrication d'éthanol (biocarburant) avec les méthodes standards de production agricole et industrielle montre que le procédé conduit à une dépense énergétique de 81090 Btu par gallon d'éthanol produit [1 Btu (British thermal unit) = 1.055 KJoule], pour une énergie finale contenue dans un gallon d'éthanol de 84100 Btu.

Sachant en outre que ce bio-carburant alimentera des moteurs classiques à explosion (rendement < 25%), on voit que le bilan énergétique et économique global de cette filière doit être évalué avec le plus grand soin.

4. ASPECTS ECONOMIQUES

Dans le contexte de la libéralisation du marché de l'électricité, la rentabilité économique devient de fait le critère majeur de choix entre les différentes sources d'énergie. Toutes les filières sont en progrès, avec un resserrement des écarts de compétitivité (fig.18) et une baisse significative du prix de l'électricité dans de nombreux pays (fig.19).

Les gains sont particulièrement sensibles pour les cycles combinés à gaz. Néanmoins, le coût du combustible intervient très différemment selon les filières et toute tension sur le prix du gaz peut remettre totalement en cause les chiffres actuels. A cet égard, le maintien de l'option nucléaire (très compétitive en base) et le développement des énergies renouvelables, pour un pays comme la France dépourvu de ressources fossiles, constituent donc une véritable police d'assurance.

La rentabilité des installations éoliennes dépend de façon critique de la qualité du "gisement" de vent disponible. Le choix approprié des sites est donc essentiel. Avec un prix du KWh entre 0.35F et 0.50F [59,60], la filière des grands aérogénérateurs (> 200 KW) intéresse d'ores et déjà EDF comme source d'appoint en période de pointe, particulièrement en hiver. Le petit éolien (10 à 60 KW), dont le

coût oscille entre 0.50F/KWh et 1 F/KWh [60] est également intéressant pour les sites isolés qui ne peuvent être raccordés au réseau à un prix compétitif. Néanmoins, à cause de son caractère intermittent, l'investissement éolien doit dans ce cas être doublé d'un investissement complémentaire (microturbine ou groupe diesel) pour pallier les périodes sans vent...

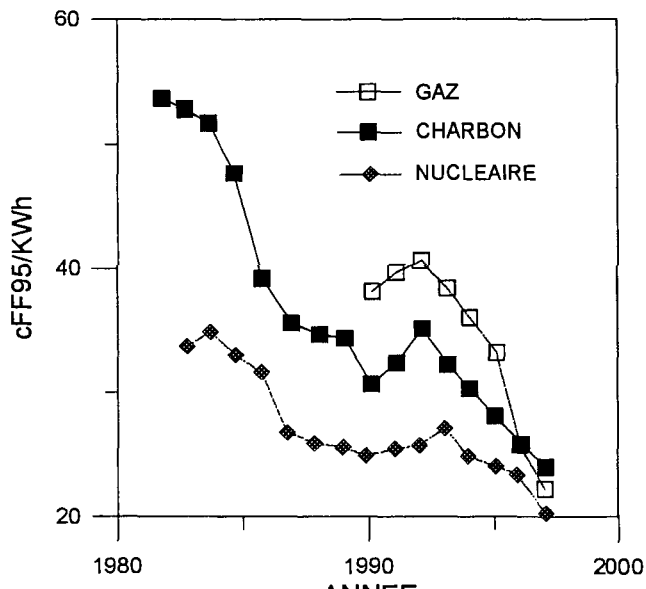


Fig. 18: Evolution du prix du KWh en France [42]

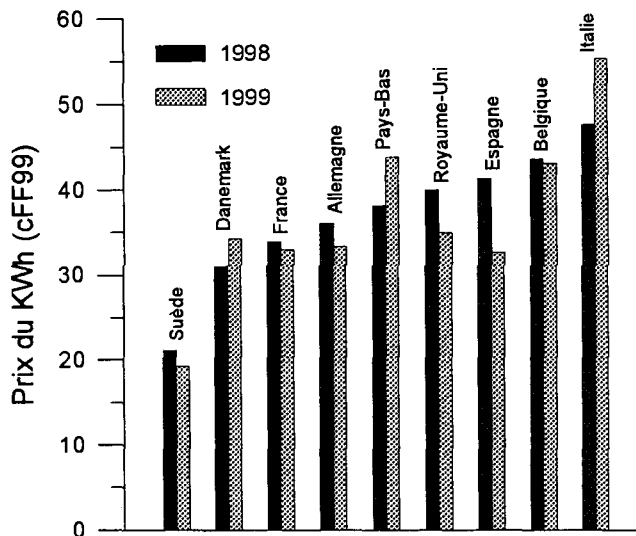


Fig. 19: Prix de l'électricité industrielle en Europe (1998-1999) [58]

Le secteur éolien a pourtant d'autres ambitions que d'être une simple énergie d'appoint. En France, le potentiel éolien on-shore (le moins coûteux) est de l'ordre de 50 TWh/an [61], représentant 13% de la production électrique.

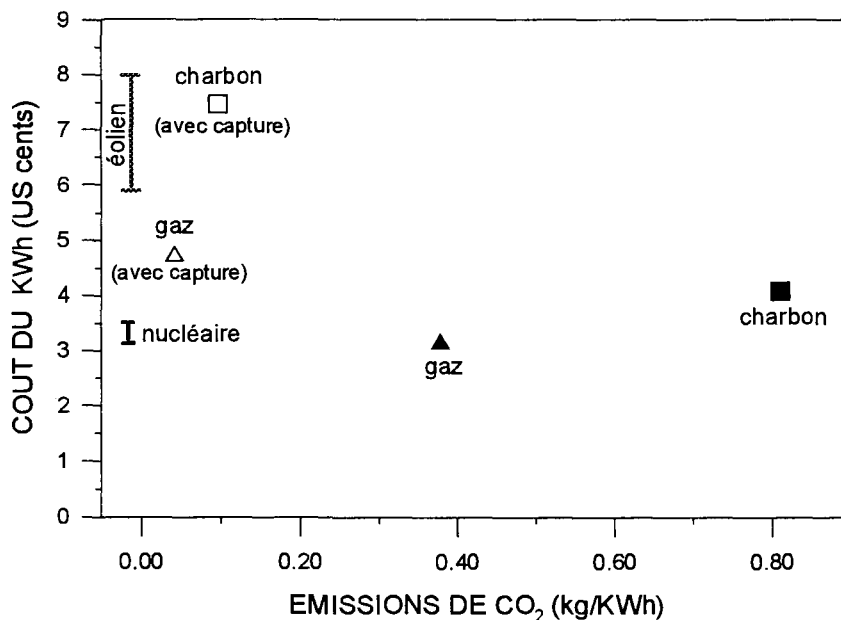


Fig. 20: Comparaison du prix du KWh des énergies non-fossiles (éolien, nucléaire) et des énergies fossiles (charbon, gaz) avec et sans surcoût lié à la capture du CO₂ [42,59-62]

clair que dans le nouveau paysage énergétique déréglementé, l'avenir de la filière passe par l'amélioration de sa compétitivité économique. Dans le contexte du changement climatique, l'internalisation des coûts liés à l'effet de serre (fig.20), par la mise en place de normes sur les rejets de CO₂, pourrait amplement faciliter le décollage économique de cette filière.

5. CONCLUSIONS

L'augmentation rapide de la teneur atmosphérique en CO₂ liée à la consommation massive des énergies fossiles, et la menace qu'elle fait peser sur l'équilibre climatique de la planète, représentent une nouvelle donne de la politique énergétique des états.

Dans une économie mondiale en expansion, dépendant encore pour près de 90% des énergies fossiles, la réduction des rejets nécessaire à la stabilisation du CO₂ atmosphérique, est une tâche extrêmement complexe.

Celle-ci requiert de s'appuyer sur les trois leviers à notre disposition que sont la maîtrise de l'énergie, la capture et le stockage géologique du CO₂, enfin et surtout, le recours accru aux énergies non-fossiles.

Dans cette stratégie, les ressources hydro-électriques et électro-nucléaires sont les atouts principaux, de part leur fort potentiel de production et leur efficacité économique. Le recours aux énergies renouvelables est également à encourager, en particulier l'énergie éolienne, dont les progrès techniques devrait lui permettre d'atteindre la compétitivité économique qui lui fait encore défaut à l'heure actuelle.

Pour répondre à la demande en énergie et aux critères de compétitivité économique dans un secteur électrique dérégulé, ces différentes énergies non-émettrices de CO₂ doivent être utilisées de manière optimale en fonction de leurs atouts respectifs.

L'exemple des résultats obtenus en France, où les émissions de CO₂ ont été réduites de 27% en l'espace de quelques années (1979-1986), malgré une augmentation de la demande énergétique, montrent qu'une politique de réduction substantielle des rejets de CO₂ est tout à fait possible.

Références

- [1] World Energy Council, Energy for Tomorrow's World, Atalink Projects Ltd, London, UK (2000)
- [2] BP Amoco Statistical Review (1999)
- [3] J.C. Casanova, Principes d'analyse économique, Institut d'Etudes Politiques (1968)
- [4] Centre d'Etudes Prospectives et d'Informations Internationales (CEPII), CHELEM-PIB database, Paris (1999)
- [5] DOE/EIA, Natural Gas 1998 : issues and trends (1998)
- [6] USGS, Gas hydrates : a new frontier (<http://sts.gsc.nrcan.ca/>)
- [7] US Department of Energy - Energy Information Administration (2000)
- [8] Boisson P., P. Criqui, Energie 2010-2020, les chemins d'une croissance sobre, Commissariat Général au Plan, La documentation Française, Paris (1998).
- [9] Sundquist E.T. and W.S. Broecker, The carbon cycle and atmospheric CO₂, natural variations Archean to Present, AGU Monograph 32 (1985).
- [10] Ngo C., Quelles énergie pour demain, CEA/DSE (1999)
- [11] Arrhenius S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. Phil. Mag., 41, 251 (1896).
- [12] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 1995. The Science of Climate Change, Cambridge University Press (1996).
- [13] Johannessen O.M et al., Satellite evidence for an Arctic sea ice cover in transformation, Science, 286 (1999).
- [14] Dyurgerov M.B. and M.F. Meier, Twentieth century climate change : evidence from small glaciers, PNAS, 97, 1406-1411 (2000)
- [15] Etheridge, D.M. et al., Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn, J. Geophys. Res., 101 (1996)
- [16] Keeling C.D., T.P. Whorf, Atmospheric CO₂ concentrations derived from in situ air samples collected at Mauna Loa, Hawaii, Scripps Institute of Oceanography, La Jolla, Univ. Of California (1998).
- [17] Fremy D., Quid, Robert Laffont ed., Paris (1997)
- [18] IPCC Special Report, emissions scenarios (2000)
- [19] DOE, Carbon Sequestration : state of the science (1999)
- [20] Smil V., The MIT Press (1999)
- [21] Charpin J.M., B. Dessus, R. Pellat, Etude économique prospective de la filière électrique nucléaire, Rapport au Premier Ministre (2000).
- [22] DOE/EIA (1997)
- [23] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Techniques, politiques et mesures d'atténuation des changements climatiques (1996).
- [24] Beecy D., Kuuskraa V., DiPietro P. The economic benefits of carbon capture and sequestration R&D under uncertainty. 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technology, Cairns, Australia (2000).
- [25] David J. and Herzog H. The cost of carbon capture. 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technology, Cairns, Australia (2000).

- [26] Stevens S.H. and Kuuskraa V.A. Sequestration of CO₂ in depleted oil and gas fields: global capacity, costs and barriers. . 5th Int. Conf. on Greenhouse Gas Control Technology, Cairns, Australia (2000).
- [27] Technology opportunities to reduce US greenhouse gas emissions. DOE report (1997).
- [28] Korbol R. and Kaddour A. Sleipner Vest CO₂ disposal - injection of removed CO₂ into the Utsira formation. *Energy Convers. Management* 36, 509-512 (1995).
- [29] Tubiana L., *Le développement durable, Rapport au Premier Ministre* (1998)
- [30] IPCC. Utilisation des terres, changements d'affectation des terres et foresterie. Rapport spécial (2000).
- [31] Lal R. World cropland soils as source or sink for atmospheric carbon. *Adv. Agrom.* 71, 145-191 (2000)
- [32] Lal R. and Bruce J. The potential of world cropland to sequester carbon and mitigate the greenhouse effect. *Env. Sci. and Policy*, 2, 177-185 (1999).
- [33] Carbon Management. Assessment of fundamental Research Needs. DOE report (1997).
- [34] Cox P.M., R.A. Betts, C.D. Jones, S.A. Spall, I.J. Totterdell. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 408, 184-187 (2000).
- [35] Rahmstorf S. and Ganopolski A. Long-term global warming scenarios computed with an efficient coupled climate model. *Climatic Change* (in press).
- [36] Robertson G.P., E.A. Paul, R.R. Harwood. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science*, 289, 1922-1925 (2000).
- [37] Betts R.A. Offset of the potential carbon sink from boreal forestation by decreases in surface albedo. *Nature*, 408, 187-190 (2000).
- [38] Energy in Europe, 1999 - Annual energy review, Directorate General for Energy, European Commission, Luxembourg (2000).
- [39] Commissariat à l'Energie Atomique, Energy data book: France in the world, Paris (1999).
- [40] IIASA/WEC joint study, Global Energy Perspectives (1998)
- [41] ENERDATA (1999)
- [42] Lederer P., F. Falgarone, La compétitivité des moyens de production de l'électricité, *Revue de l'énergie*, 492 (1997)
- [43] Mission Interministérielle de l'Effet de Serre, Programme national de lutte contre le changement climatique 2000/2010 (2000).
- [44] Ihm S.K., Park Y.K., Jeon J.K et al. A study on methanol synthesis through CO₂ hydrogenation over copper-based catalysts. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 114, 533-536 (1998)
- [45] Inui T., Yamamoto T., Inoue M. et al. Highly effective synthesis of ethanol by CO₂ hydrogenation on well balanced multi-functional FT-type composite catalysts. *Appl. Catal.*, A 186, 395-406 (1999)
- [46] Fiato R.A., Iglesia E., Rice G.W. et al. Iron catalysed CO₂ hydrogenation to liquid hydrocarbons. *Stud. Surf. Sci. Catal.*, 114, 339-344 (1998).
- [47] Kusuma H., Okabe K., Shishikura I. et al. CO₂ hydrogenation to ethanol over promoted Rh/SiO₂ catalyts. *Catal. Today*, 28, 261-266 (1996).
- [48] CEA/DSE (1999)
- [49] Saglio J.F., Une nouvelle génération de réacteurs, *La Recherche*, 328 (2000).
- [50] World Energy Council. Survey of Energy Resources (1998)

- [51] Flavin C. Wind power sets new records in 1998. Worldwatch Institute Press, Briefing on wind power, Dec. 30 (1998).
- [52] IPCC. Climate Change 1995. Economic and social dimensions of climate change. Cambridge University Press (1996).
- [53] Solar Energy in California (<http://www.energy.ca.gov/solar/>)
- [54] Observ'er, Baromètre de la géothermie, Systèmes solaires, 131 (1999)
- [55] Observ'er, Baromètre de la biomasse, Systèmes solaires, 127 (1998)
- [56] OCDE/AIE, 1998
- [57] Lorentz D. and Morris D. How much energy does it take to make a gallon of ethanol ? Institute for Local-Self Reliance (1995).
- [58] Revue de l'Energie, 518 (2000)
- [59] Chabot B., Scénario éolien 3000 MW en France en 2010: première évaluation des tarifs et des surcoûts. Revue de l'Energie, 517, 290-294 (2000).
- [60] Enerpresse 7498, 20 Janv.2000
- [61] www.espace-eolien.fr
- [62] David J., Economic evaluation of leading technology options for sequestration of carbon dioxide. Master of Science, MIT (2000).