

La **division par 4** des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici **2050**

Introduction au débat





L e Ministre

Le troisième rapport du Groupe Intergouvernemental d'experts sur l'Evolution du Climat (GIEC) ne laisse plus de place au doute quant à la réalité du changement climatique : en l'absence d'une réduction de grande ampleur des émissions de gaz à effet de serre découlant de l'activité humaine, notre planète connaîtra une augmentation moyenne de la température au sol de 1,4 à 5,8 °C d'ici à la fin du siècle, réchauffement entraînant une multiplication des événements climatiques extrêmes, une montée du niveau des océans, une avancée des déserts, etc, avec la cohorte de drames humains et l'explosion des coûts que ces phénomènes vont engendrer. Ces impacts nous interdisent l'inaction, dont les générations futures ne pourraient à juste titre que nous blâmer. Il nous faut donc agir, sans tergiverser.

A la lumière du rapport des experts réunis au sein du GIEC et afin de limiter les impacts du changement climatique sur la planète, nous parvenons à la conclusion qu'il est nécessaire de limiter la concentration de dioxyde de carbone à moins de 450 parties par million en volume. Cette option est compatible avec l'objectif européen de tenter de contenir le réchauffement mondial à moins de 2 °C. Compte tenu de l'inertie du système climatique, nous n'en sommes d'ores et déjà pas loin. Si l'on retient cet objectif, c'est une division par deux des émissions mondiales de gaz à effet de serre dans leur ensemble qu'il nous faut opérer à l'horizon de 2050. Compte tenu de la responsabilité historique que portent les vieilles nations industrielles, et afin que le respect de cet objectif ne ruine pas les perspectives de développement des pays du Sud, cet objectif conduit à une division de l'ordre de quatre des émissions des pays industrialisés sur la même période. La France, ainsi que l'a indiqué l'an passé le Premier ministre devant l'assemblée du GIEC réunie à Paris, a fait sien cette perspective.

Comment y parvenir ? Compte tenu de la nature du phénomène, seules les politiques qui s'inscriront résolument sur une longue période seront pertinentes. Leur mise en œuvre suppose, afin d'éclairer les choix possibles, que soient lucidement analysés, pour chacun des grands secteurs émetteurs de gaz à effet de serre, les différents scénarios relatifs à leur consommation énergétique à l'horizon 2050. Tel est l'objet de l'étude réalisée par la MIES et qui vous est aujourd'hui présentée.

Elle montre, notamment, que l'utilisation massive de combustibles fossiles pour la production d'énergie dans l'industrie, l'habitat et le tertiaire, par ailleurs source d'une dépendance extérieure excessive, devra disparaître. Elle souligne à l'inverse l'incontournable nécessité :

- de poursuivre, dans tous les secteurs, les efforts engagés afin d'atteindre un degré d'efficacité énergétique maximale, ce qui implique, de la part de tous, de nouveaux comportements ;
- de réduire très fortement la consommation de pétrole dans le secteur des transports ;
- d'amplifier rapidement le recours aux énergies renouvelables ;

L'étude insiste enfin sur le rôle complémentaire que peuvent jouer les progrès technologiques. Il importe dès lors d'intensifier les efforts de recherche et développement en vue de raccourcir les délais permettant de véritables ruptures technologiques (stockage de l'électricité, séquestration du carbone, recours à l'hydrogène).

Au plan économique, ces politiques de longue haleine, dès lors que le prix de la tonne de carbone reflète bien le coût des dommages évités, apportent d'elles-mêmes les marges de manœuvre dont ont besoin les agents économiques, l'Etat au premier chef, pour les mettre en œuvre. Réduisant la facture énergétique du pays, elles libèrent une grande partie des ressources nécessaires.

Les simulations présentées dans cette étude, qui préfigurent notre avenir, méritent à l'évidence d'être discutées et approfondies, exercice qui perdrait cependant une grande part de son sens s'il n'était conduit, s'agissant de la France, d'abord à l'échelle de l'Union européenne, ensuite, dans le cadre de la Convention cadre des Nations unies sur les changements climatiques, à l'échelle internationale.

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized, fluid line that starts with a small loop, rises to a peak, and then extends horizontally to the right.

Serge Lepeltier

Ce rapport de mission, rendu à la **MIES** en mars 2004, à été préparé par **Pierre Radanne**, alors chargé de mission à la MIES et ancien président de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie).

La **division par 4** des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici **2050**

Introduction au débat

-  **1 La division par 4 des émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2050** p 7
 -  **2 Analyse de la répartition actuelle et future des émissions** p 8
 -  **3 La présentation de l'exercice de simulation à 2050** p 10
 -  **4 Les évolutions par secteurs consommateurs** p 12
 -  **5 Les enseignements des différentes variantes** p 24
 -  **6 La hiérarchisation des choix** p 25
 -  **7 Analyse économique des stratégies de facteur 4** p 28
 -  **8 Les politiques publiques de lutte contre l'effet de serre** p 33
 -  **9 Et pour l'Europe et le Monde ?** p 34
- Conclusion** p 35



La division par 4 des émissions françaises de gaz à effet de serre d'ici 2050

Les pays aujourd'hui émergents auront en 2050 des émissions de gaz à effet de serre par habitant se rapprochant de celles des pays d'industrialisation ancienne. La limitation planétaire globale du niveau d'émission, placera les pays en rivalité quant à leur possibilité d'émettre ces gaz perturbateurs du climat. Il faut clairement envisager le risque d'une tension internationale croissante. D'un côté, les pays industrialisés rencontreront des difficultés à faire accepter par leur opinion publique une réduction de leurs émissions car elle nécessitera des modifications de modes de vie, des changements d'énergie et une profonde restructuration des transports. Ces obstacles pourraient se traduire par des progrès très lents de réduction de leurs émissions. D'un autre côté, les pays du sud verront leur développement rendu plus difficile par un durcissement progressif des niveaux d'émission autorisés. Comment en effet assurer une amélioration du niveau de vie quand beaucoup de pays connaissent une croissance démographique encore forte, et parvenir à investir dans des technologies moins émettrices de gaz à effet de serre mais initialement plus coûteuses tandis que par ailleurs les prix des énergies vont avoir tendance à croître ? Dans ces conditions le fossé nord-sud risque de se creuser et d'entraîner des tensions politiques graves. En l'absence d'une réponse forte à l'accroissement de l'émission de gaz à effet de serre, c'est un réchauffement pouvant aller jusqu'à 6° C à la fin du siècle qu'il faut redouter. Ce sera là un bouleversement d'ampleur équivalente à la sortie de l'ère glaciaire, il y a près de 10 000 ans. Avec une température moyenne annuelle de 6° C inférieure à aujourd'hui, la banquise descendait jusqu'à Londres.

On a peine à imaginer l'ampleur des impacts d'une aggravation durable de l'effet de serre : destruction d'écosystèmes naturels, avancée des déserts, déplacement des aires géographiques de cultures et donc migrations de populations, lente et irrésistible montée du niveau des océans, ... En conséquence, une transformation des conditions de vie sur terre impliquerait des politiques lourdes d'adaptation (protection des côtes, modification des pratiques agricoles, protection contre les événements climatiques extrêmes). La lutte contre le changement climatique a pour objectif d'éviter des coûts économiques considérables et de réduire les tensions internationales que cela provoquerait.

Un jour ou l'autre, il faudra décider d'une convergence des émissions par habitant entre pays, soit une sorte de suffrage vraiment universel avec un plafond annuel d'émission d'environ une demie tonne de carbone par habitant. La paix l'exigera. Cet objectif permettra, espérons-le, de ne pas dépasser une concentration de 450 ppm par m³ de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. En fait, une réelle stabilisation du climat au niveau actuel ne serait garantie que par l'émission totale de 3 Milliards de tonnes de carbone par an¹. Le rythme actuel d'émission de 6 MdtC devra être réduit le plus vite possible. Plus cela tardera, plus le climat s'emballera, plus les désordres seront grands et plus forte devra finalement être la réduction des émissions. Il n'existe pas encore de scénario détaillé permettant une stabilisation du climat. En clair, toutes les projections indiquent à l'horizon 2050 une tendance forte à la hausse des émissions (entre 9 MdtC et 20 MdtC), les émissions des pays industrialisés au mieux diminuant faiblement tandis que celles des pays en développement croîtront très vite.

Une première inflexion des émissions pourrait consister à se fixer un objectif de 5 MdtC en 2050, ce qui correspondrait alors pour une population mondiale d'environ 10 Mds d'habitants à un quota par personne d'une demie tonne de carbone par an. Il est probable que cette trajectoire conduise à une concentration de dioxyde de carbone dans l'atmosphère de l'ordre de 550 ppmv. Les experts considèrent qu'alors un réchauffement de 2° C devient inévitable. On verra plus loin à quel point les destins des pays industrialisés et de ceux en développement sont liés. Le niveau futur d'émission des pays en développement dépend des progrès technologiques réalisés par les pays industrialisés car ce sont eux qui conçoivent les machines, les appareils ménagers ou les véhicules. L'engagement ensuite des pays en développement, si déterminant à terme pour le climat mondial, dépend de l'efficacité et de la sincérité de la lutte contre l'effet de serre conduite par les pays industrialisés.

Le Président de la république et le Premier ministre ont donc fixé le cap pour la France, au nom de cette vision de long terme, en proposant une division d'un facteur 4 de nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050². Puisque le niveau français d'émissions de dioxyde de carbone lié aux consommations énergétiques était de 1,8 tC/hab en 2000, atteindre ce niveau de 0,5 tC/hab constituerait précisément une division par 3,6. Transposé en 2050 à une population française de 64 millions d'habitants, un niveau d'émission de 0,5 tC/hab donne 32 MtC. Or, bien évidemment, d'ici 2050, la croissance économique devrait générer des émissions supplémentaires. Une projection tendancielle des émissions de dioxyde de carbone à partir d'une croissance économique moyenne de 1,7 %/an³ conduirait à une émission de CO₂ de 146 MtC en 2050 avant tout nouvel effort de maîtrise ou de substitution d'énergie. C'est donc une division par 4,6 qu'il faudra alors finalement réussir.

1 - Ce chiffre correspond à l'absorption naturelle du CO₂ par les puits (essentiellement l'océan). Il en résulterait une concentration de 450 ppmv/m³.

2 - Le concept de Facteur 4 a été introduit par Ernst Ulrich von Weizsäcker et Amory et Hunter Lovins en 1997 dans le livre du même nom (éditions Terre Vivante).

3 - La croissance économique des 30 dernières années a été de 2 % par an avec une croissance démographique de 0,3%. Une croissance de 1,7% prolonge cette tendance puisque la croissance démographique devient très faible.



Analyse de la répartition actuelle et future des émissions

Présentation globale des émissions de 2000

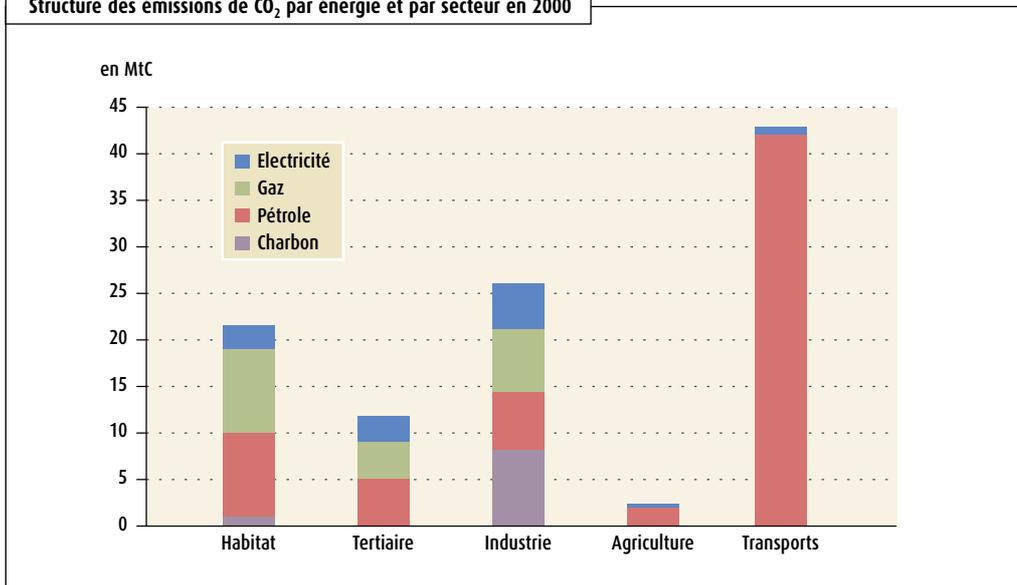
Les consommations d'énergie se sont traduites en 2000 par l'émission de 105,2 MtC⁴ dont 6 MtC pour la sidérurgie, 19 MtC pour l'industrie, 23 MtC pour le résidentiel, 12 MtC pour le tertiaire, 3 MtC pour l'agriculture et 43 MtC pour les transports.

Sa décomposition est aussi intéressante par énergie finale, charbon : 9 MtC, pétrole : 65 MtC, gaz : 20 MtC et 11 MtC pour la production d'électricité.

On peut en tirer trois constats.

- Le poids du pétrole reste lourd puisqu'il induit encore près de 2/3 des émissions.
- Les émissions imputables à l'électricité sont par contre faibles puisque seulement un dixième de celles-ci est produite à partir de combustibles fossiles.
- Les énergies renouvelables n'émettent elles pas de CO₂ (celui produit lors de la combustion de la biomasse est absorbé lors de la culture de nouveaux plants via la photosynthèse).

Structure des émissions de CO₂ par énergie et par secteur en 2000



Cette présentation des émissions doit être comparée avec la consommation d'énergie. Le diagramme qui suit décrit les flux de la consommation énergétique française de 2000.

Il se lit de haut en bas, en partant de l'approvisionnement, de la consommation d'énergie primaire, en déduisant les pertes de transformation du secteur énergétique, on obtient la consommation d'énergie finale (ventilée par énergie et par secteur) puis compte tenu des rendements d'utilisation la consommation d'énergie vraiment utile pour satisfaire les besoins.

Cette consommation d'énergie utile est calculée sur la base de l'application des meilleures technologies existantes dans chacun des usages de l'énergie. Ce concept d'énergie utile est donc historiquement daté, les progrès technologiques permettant de repousser régulièrement cette limite. Cette notion d'énergie utile décrit précisément les besoins sociaux exprimés par les consommateurs et les acteurs économiques.

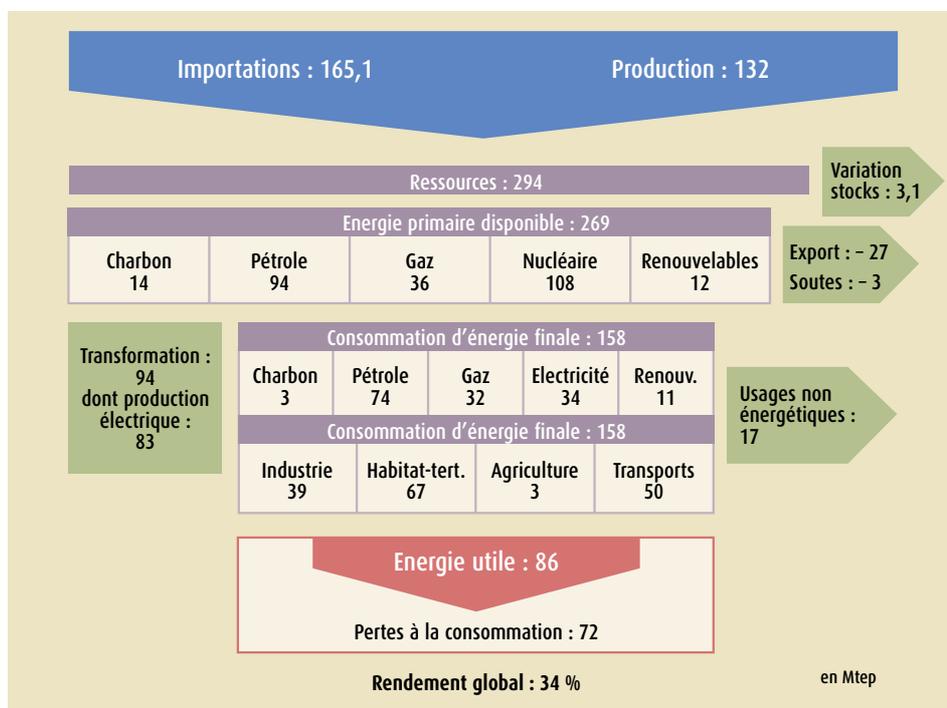
Bilan en énergie utile

En Mtep	Charbon-Coke		Pétrole		Gaz		Electricité				Renouvelables		Hydro-gène	Total
	Usage th.	Procédé	Usage th.	Carburant	Chauf. loc.	Usage th.	Usage th.	Procédé	Moteurs	Eclairage	Usage th.	Biocarb.		
Sidérurgie	1.44	3.37	0.08	0.00	0.00	0.05	0.34	0.05	0.48	0.00	0.00	0.01	0.00	5.81
Industrie	1.15	0.37	5.25	0.16	1.05	8.73	1.51	1.32	6.90	0.00	1.03	0.01	0.00	27.48
Résidentiel	0.24	0.09	7.49	0.00	9.20	0.31	3.44	3.07	0.63	0.20	3.20	0.01	0.00	27.88
Tertiaire	0.05	0.04	3.35	0.00	3.18	0.16	1.51	2.66	1.36	0.68	0.73	0.01	0.00	13.72
Agriculture	0.00	0.00	0.00	0.62	0.23	0.00	0.01	0.00	0.18	0.00	0.02	0.00	0.00	1.06
Transports	0.00	0.00	0.00	9.63	0.02	0.00	0.00	0.00	0.63	0.00	0.00	0.07	0.00	10.35
Total	2.89	3.87	16.17	10.42	13.67	9.25	6.80	7.10	10.18	0.88	4.97	0.11	0.00	86.30

4 - On n'a pris en compte dans cette analyse que les émissions de dioxyde de carbone lié aux consommations d'énergie.

On constate un rendement global de 34 % du système énergétique français.

Les flux en 2000



► L'enjeu d'une division par 4 des émissions

On peut comparer cette situation 2000 à une évolution tendancielle (avant tout effort de maîtrise de l'énergie ou de substitution) et à l'objectif de 32 MtC pour 2050.

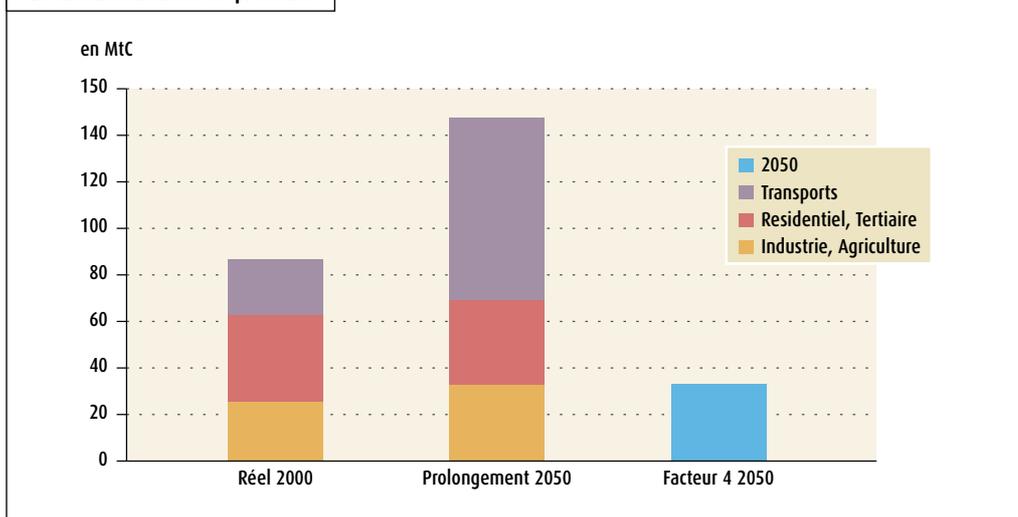
Les usages thermiques des secteurs résidentiel et tertiaire émettent à eux seuls déjà autant que ce qui sera possible en 2050 pour tous les secteurs économiques.

Les transports émettent déjà aujourd'hui 1,3 fois plus que ce qui sera possible pour le pays en 2050 ; or leurs émissions continuent actuellement de croître à près de 2 % par an en absorbant les progrès réalisés dans les autres secteurs.

Le secteur électrique, lui ne peut plus guère progresser par rapport à son niveau actuel.

Le graphique qui suit permet de visualiser cet enjeu.

Le dimensionnement du problème





La présentation de l'exercice de simulation à 2050

Ce texte présente les conditions d'une telle division par 4 des émissions. Il s'appuie sur un premier exercice de projection à 2050 des consommations d'énergie et des émissions de dioxyde de carbone. Malheureusement, dans le format de cet article, il n'est pas possible d'en détailler toutes les simulations et d'en présenter en détail la méthodologie. Les seuls éléments quantitatifs ici introduits constituent des ordres de grandeur dont la robustesse a été vérifiée.

La sensibilité à la croissance économique et sa répartition

Le taux de croissance de 1,7 % retenu conduit à une multiplication par 2,3 du PIB en 2050. Il en découlera une consommation énergétique liée à ces besoins sociaux nouveaux en croissance de 60 %⁵. Cette moindre augmentation s'explique à la fois par la saturation de certains usages thermiques tandis que les nouveaux usages se traduiront par des consommations énergétiques, surtout électriques, moins intensives en énergie.

Demande en énergie utile pour 2050

En Mtep	Charbon-Coke		Pétrole		Gaz		Electricité				Renouvelables		Hydro-gène	Total
	Usage th.	Procédé	Usage th.	Carburant	Chauf. loc.	Usage th.	Usage th.	Procédé	Moteurs	Eclairage	Usage th.	Biocarb.		
Sidérurgie	1.44	3.37	0.05	0.00	0.00	0.03	0.37	0.11	0.64	0.00	0.00	0.01	0.00	6.02
Industrie	0.70	0.22	3.18	0.27	1.05	21.30	2.75	3.37	15.27	0.00	1.69	0.01	0.00	49.80
Résidentiel	0.24	0.09	7.49	0.00	17.98	0.47	6.73	7.28	1.46	0.36	6.40	0.01	0.00	48.51
Tertiaire	0.05	0.04	3.71	0.00	6.06	0.28	2.03	8.29	3.01	1.36	1.25	0.01	0.00	26.09
Agriculture	0.00	0.00	0.00	1.02	0.23	0.00	0.01	0.00	0.37	0.00	0.03	0.00	0.00	1.66
Transports	0.00	0.00	0.00	22.62	0.02	0.00	0.00	0.00	1.09	0.00	0.00	0.17	0.00	23.89
Total	2.43	3.72	14.42	23.90	25.34	22.08	11.88	19.05	21.84	1.73	9.38	0.21	0.00	155.98

Au-delà, deux enjeux majeurs vont déterminer la relation entre la croissance économique et les consommations d'énergie, l'ampleur de la dématérialisation de l'économie notamment avec le développement des technologies de communication et surtout l'évolution de la mobilité des personnes et des biens. L'accroissement de la mobilité des personnes et des biens restera vif dans les décennies à venir et aura pour moteur toutes les formes d'ouverture au monde, qu'il s'agisse de la construction européenne, de la mondialisation de l'économie et de l'aspiration individuelle au voyage.

Si la croissance économique va influencer fortement sur le niveau de consommation d'énergie et donc celui des émissions de dioxyde de carbone, l'inverse est aussi vrai. La contrainte climatique pourrait à l'avenir fortement modifier le contenu de la croissance. Il existe une interaction complexe entre la problématique de l'effet de serre et l'avenir de la croissance économique. Voir dans l'effet de serre une menace pour la croissance économique (c'est ce qui a fondé la décision de retrait des Etats-Unis du protocole de Kyoto par le Président G.W. Bush) résulte d'une approche simplificatrice. D'abord, parce que ce siècle connaîtra inévitablement des tensions quant à son approvisionnement en hydrocarbures. La question du changement climatique à la fois anticipe cette contrainte en même temps qu'elle l'adoucit en imposant des progrès d'efficacité énergétique avant que les prix du pétrole ne s'embrasent. On verra ensuite dans la présentation qui suit que l'enjeu central est celui de l'amélioration du rendement global de notre système énergétique, ce qui accroîtra sa performance économique et donc réduira les coûts globaux.

Pour apprécier cette croissance de la consommation d'énergie, il est utile de rappeler l'évolution depuis 30 ans. Le graphique ci-dessous fait apparaître une croissance économique par habitant de 65 % entre 1973 et 2002 (1,7 % par an en moyenne) pour une augmentation de 33 % de la consommation en énergie primaire et seulement de 8 % en énergie finale par habitant. Dans ce graphique, tous les taux de croissance ont été basés à partir d'un indice 1 en 1973, date du premier choc pétrolier.

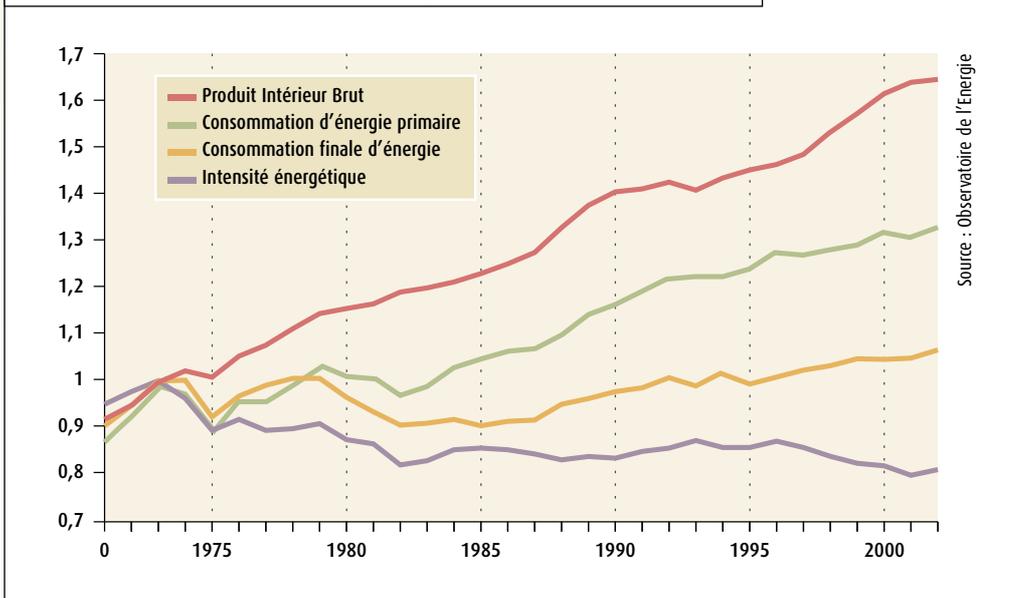
En énergie primaire, une croissance du PIB de 2 points n'a impliqué une augmentation que d'un point de la consommation d'énergie. La croissance encore plus faible de la consommation d'énergie finale, qui elle décrit le mieux la satisfaction des besoins sociaux, s'explique par un rendement moindre des réacteurs nucléaires par rapport aux anciennes centrales thermiques⁶.

Cette quasi stabilisation de la consommation d'énergie finale par habitant résulte des importants progrès de maîtrise de l'énergie réalisés surtout jusqu'au contre-choc pétrolier de 1986 et par les puissants mouvements de substitution vers des techniques efficaces faisant appel principalement à l'électricité et au gaz. Cette dernière composante ne jouera plus avec la même puissance à l'avenir, les principaux mouvements de substitution du charbon et du pétrole dans leurs usages thermiques étant derrière nous.

5 - Ce calcul des besoins sociaux a été effectué en énergie utile avant introduction des rendements des équipements consommateurs pour alors obtenir une consommation d'énergie exprimée en énergie finale.

6 - Le rendement moyen des réacteurs nucléaires est de 33 % contre une moyenne de 38 % pour le parc thermique à flamme. Une part croissante de l'énergie a été ainsi dissipée dans les transformations entre énergies primaires et énergies finales (plus de 80 Mtep en 2000). Cet effet technique qui a accompagné la montée en puissance du parc nucléaire, essentiellement, entre 1980 et 1995 ne s'amplifie plus maintenant.

Croissance économique et consommation d'énergie en France par habitant (1970-2002)



La présentation des variantes

Parmi les variantes élaborées pour tester la sensibilité des évolutions possibles, certaines se concentrent sur différents degrés de maîtrise de l'énergie, d'autres étudient des parts de marché différentes entre énergies tandis qu'une dernière catégorie de variantes a pour finalité d'atteindre une division par 4 des émissions de carbone.

Dans cette note de synthèse on mentionnera principalement 8 variantes (parmi les 19 testées) :

► Une variante sans aucun progrès d'économie d'énergie (notée « **sans Eco** » dans les graphiques) au-delà des performances moyennes des équipements d'ores et déjà en vente et sans inflexion nouvelle des tendances de substitution (au-delà du remplacement spontané du charbon et du pétrole sous chaudière par le gaz, de la pénétration de l'électricité dans les procédés et les usages thermiques dans l'habitat, et du maintien de la position hégémonique du pétrole dans les transports).

► Une variante avec amélioration du niveau d'efficacité énergétique (notée « **Eco** ») mais sans modification des parts de marché entre énergies par rapport à la variante précédente. Cette variante ne sature pas totalement les possibilités technologiques actuelles et ne suppose aucune percée technologique nouvelle.

► Une variante de seule réponse à la contrainte climatique par modification de l'offre d'énergie (notée « **Offre** »), c'est à dire par des substitutions principalement en faveur de l'électricité d'origine nucléaire mais à l'inverse sans aucun nouveau progrès d'efficacité énergétique.

Ces deux dernières variantes permettront de situer les effets de deux options opposées, agir par la demande ou par l'offre.

Après ces variantes de base, de nombreuses variantes à caractère technique ont permis de tester différentes sensibilités dont on ne mentionnera dans ce texte que les enseignements particuliers⁷.

Ainsi, une variante permet de tester à la place du nucléaire le recours à des turbines à gaz pour assurer la production électrique.

Les 5 variantes suivantes se situent dans l'objectif d'une division d'un facteur 4 des émissions et combinent des progrès généralisés de maîtrise de l'énergie et des mouvements de substitution dans les usages thermiques, les transports et la production électrique.

► Une variante avec développement accru du nucléaire (notée « **F4 nucléaire** ») et de la pénétration de l'électricité dans tous les usages y compris les transports ;

► Une variante équilibrant le recours au nucléaire par développement de la cogénération et des renouvelables (notée « **RCogN** ») ;

► Une variante maintenant une place importante aux combustibles fossiles et intégrant une séquestration du CO₂ (notée « **F4 Séquest** »), avec allègement des contraintes de substitution notamment dans les transports ;

► Une variante de sortie du nucléaire avec recours à la séquestration du dioxyde de carbone (notée « **F4 sN+S** ») ;

► Une variante de mise en place d'une filière hydrogène alimentée par des centrales nucléaires (notée « **F4 H₂** »).

7 - Deux variantes ont été construites pour tester une dégradation des comportements ou au contraire leur amélioration. Trois variantes techniques ont ensuite été élaborées autour des enjeux du bâtiment, des transports et de l'industrie. Des scénarios de recombinaison non optimisés ont permis ensuite de croiser les progrès d'efficacité énergétique des changements dans l'offre d'énergie.

Toutes les variantes assurent strictement le même volume d'énergie utile dans chaque catégorie d'usage et décrivent donc bien la même France de 2050.

Par ailleurs, ces simulations sont basées sur l'hypothèse prudente d'un seul progrès technologique incrémental (avec des performances énergétiques qui n'excèdent pas de plus de 20 % les meilleures actuelles).

Dans l'analyse qui suit de l'évolution des différents secteurs, on dégagera :

- les « interdits », c'est-à-dire les évolutions incompatibles avec une division par 4 des émissions,
- les « incontournables », c'est-à-dire à l'inverse les évolutions obligatoires,
- les « points durs », c'est-à-dire les usages pour lesquels l'utilisation de combustibles fossiles sont les moins substituables et qui seront donc prioritaires dans l'allocation du potentiel d'émission du facteur 4,
- les « espaces de choix » quand différentes stratégies conduisent à des résultats équivalents,
- et les « ruptures » qui regroupent les sauts technologiques majeurs qui pourraient venir élargir les marges de manœuvre.



Les évolutions par secteurs consommateurs

► L'industrie, un secteur caractérisé par une amélioration continue de son efficacité énergétique et une réduction de ses émissions

L'hypothèse de croissance de l'activité industrielle retenue est de 1,2 % par an et une stabilité de la sidérurgie.

On n'a pas ici pris en compte les tendances de délocalisation des industries de base ; celles-ci se traduiraient par une réduction plus forte des émissions mais aussi probablement par un quota d'émissions moindre pour la France dans une optique d'équité de la répartition mondiale des émissions par habitant. Contrairement à l'idée établie, la part des industries grosses consommatrices d'énergie ne connaît pas une chute rapide. Si en effet, les consommations d'énergie de secteurs comme la sidérurgie, le ciment, le textile sont en baisse, d'autres sont stables (non ferreux, verre), tandis que d'autres connaissent une hausse régulière (agro-alimentaire, chimie, papier-carton). L'activité industrielle s'orientera surtout vers des activités manufacturières à haute valeur ajoutée et localisées près des marchés consommateurs.

Par contre, ce taux de croissance de 1,2 %, plus faible que celui de la croissance économique globale, prend en compte une poursuite de la tertiarisation de l'économie.

L'augmentation de 82 % de l'activité industrielle ainsi obtenue en 2050 devrait conduire à une augmentation de la consommation d'énergie de 58 % avant tout progrès nouveau d'efficacité énergétique. Cette réduction découle d'une croissance plus forte des usages électriques (moteurs, procédés) qui caractérisent les industries manufacturières que des usages thermiques classiques des industries de première transformation des matières premières.

Il est très probable qu'une grande partie des progrès d'efficacité énergétique qui étaient possibles avec les techniques actuelles soit déjà derrière nous puisque depuis 1973, l'intensité énergétique de l'industrie a baissé de 43 %.

Par ailleurs, pendant la même période, les mouvements de substitution ont aussi été de grande ampleur, la consommation de charbon dans l'industrie a baissé de 8 Mtep (- 43 %), celle de pétrole de 17 Mtep (- 70 %), tandis que celle de gaz augmentait de 7 Mtep (+ 190 %) et celle d'électricité de 5 Mtep (+ 65 %).

Le secteur industriel se trouve maintenant placé devant un interdit clair : celui d'un usage généralisé du charbon et du pétrole pour les usages thermiques, même à haut rendement. D'ailleurs, on constate déjà un déclin rapide des consommations de charbon et du pétrole hors procédés en faveur d'une production de chaleur décentralisée par le gaz. Il en résulte une contraction régulière des émissions de CO₂. Cet interdit peut toutefois être levé avec la capacité de séquestrer massivement le dioxyde de carbone dans d'anciens gisements pétroliers et gaziers ou dans des nappes aquifères en grande profondeur. Mais cela ne concernera que les émissions des très grosses installations industrielles et de la production d'énergie.

Pour le reste, le niveau de consommation d'énergie de l'industrie dépendra des progrès d'efficacité énergétique. C'est là une nécessité incontournable.

Avant tout effort de maîtrise de l'énergie, le niveau de consommation de 2050 serait en hausse de 57 %.

Elle peut prendre 4 formes :

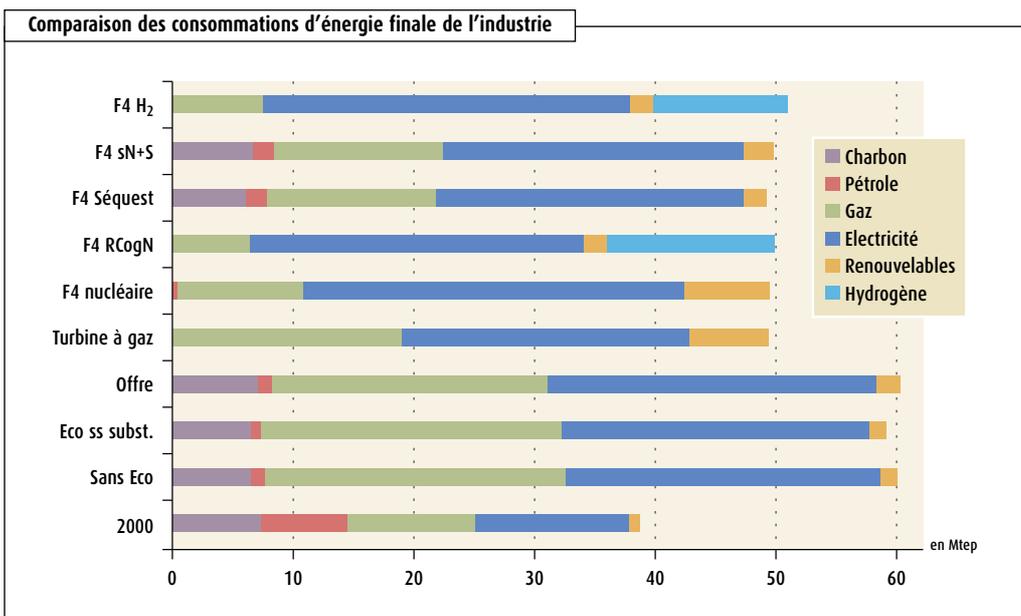
- une amélioration des équipements industriels mis sur le marché (moteurs, machines, contrôle électronique),
- une amélioration continue des procédés afin d'économiser l'énergie y compris dans les PMI,
- un développement des procédés électriques en remplacement de procédés thermiques (évaporation, séchage, séparation) ou dans les procédés chimiques,
- et un développement du recyclage (acier, métaux, papier, plastiques, matériaux) pour réduire les consommations d'énergie thermique dans la phase initiale de transformation des matières premières, de loin la plus gourmande en combustibles fossiles.

Il s'agit là d'évolutions déjà engagées qu'il convient de conforter.

Les variantes intégrant une forte amélioration de l'efficacité énergétique conduisent à une économie du quart de la consommation d'énergie d'ici 2050, soit à un rythme du même ordre que celui connu dans les 30 dernières années.

Le bilan en carbone du secteur industriel peut être fortement réduit par une association des besoins thermiques avec une production d'électricité en cogénération qui vient elle-même réduire la sollicitation de turbines à gaz. Dans les variantes où le recours au nucléaire est modéré ou nul cette cogénération privilégiera l'utilisation de piles à combustible à haute température du fait de leur très haut rendement de production d'électricité.

Dans les variantes ayant une production électrique très faiblement carbonée du fait du recours au nucléaire est introduite l'utilisation d'hydrogène pour certains usages thermiques.



En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	6,74	5,58	5,57	5,96	0,03	0,03	0,03	5,09	5,77	0,03
Pétrole	7,29	1,73	1,51	1,62	0,05	0,34	0,08	2,21	2,21	0,08
Gaz	11,06	25,96	25,84	23,62	18,82	10,87	5,83	16,35	16,35	6,61
Electricité	11,92	25,07	24,19	26,77	24,77	31,80	28,74	22,64	22,06	30,62
Renouv.	1,23	1,90	1,90	2,43	5,56	6,31	2,66	2,82	3,43	2,41
Hydrogène							13,73			11,53
Total	38,24	60,24	59,02	60,40	49,24	49,35	51,07	49,11	49,83	51,29

Les variantes de facteur 4 se différencient essentiellement par le niveau de pénétration de l'électricité en substitution aux combustibles fossiles. Les potentiels de gains permettent de retrouver une consommation 2050 en hausse de seulement 30 % par rapport à celle de 2000.

► La prévisibilité et la stabilité des émissions liées au confort des bâtiments

La « décohobitation » des ménages et l'accroissement des surfaces des logements neufs par rapport à ceux remplacés se traduisent par un accroissement du parc de logements de près de 1 % par an, ce qui tire les consommations d'énergie à la hausse. Le tertiaire présente un taux de croissance des surfaces construites plus vif que celui de l'habitat, il est proche de 2 %.

Depuis 30 ans, des progrès considérables ont été effectués dans la construction neuve avec une consommation d'énergie moyenne d'un logement neuf réduite de 60 % à confort équivalent depuis l'instauration des réglementations thermiques depuis 1973. Comme les besoins de chauffage et de production d'eau chaude du résidentiel et du tertiaire ont généré en 2000 l'émission de 30 MtC soit 28 % des émissions nationales, l'objectif de facteur 4 ne peut être tenu sans un effort massif d'isolation et d'amélioration des équipements thermiques des bâtiments.

Les variations des facteurs déterminant les évolutions sont de faible amplitude dans le résidentiel-tertiaire (consommation d'énergie assez stable, corrélée pour l'habitat essentiellement sur la démographie) mais ce secteur présente aussi de fortes inerties (renouvellement du parc bâti en un siècle en moyenne). Le niveau de performance du patrimoine bâti ancien pèsera lourd dans la consommation totale d'énergie. Compte tenu du rythme lent de renouvellement du parc bâti, le renforcement de la réglementation thermique devra intervenir rapidement tandis qu'un programme de réhabilitation lourde permettra de rapprocher les consommations du patrimoine bâti des standards de la construction neuve. Avec cette dynamique, la consommation d'énergie pour le chauffage et la production d'eau chaude de 2050 pourrait passer de 70 à 44 Mtep (elle était de 52 Mtep en 2000).

Des progrès technologiques récents peuvent trouver leur traduction dans de nouvelles réglementations thermiques dans l'habitat et surtout le tertiaire (vitrages peu émissifs, procédés de construction réduisant les ponts thermiques, isolants performants de faible épaisseur, chaudières gaz à condensation, pompes à chaleur géothermales...). En fait, les scénarios qui satisfont aux critères du facteur 4 impliquent une consommation tendant vers 50 kWh par m³ chauffé. Il conviendra toutefois de prendre en compte la demande croissante de confort d'été en évitant une explosion des consommations d'électricité par multiplication des climatiseurs dans des logements mal isolés et sans protection contre le rayonnement solaire direct.

Le niveau des émissions liées aux besoins de chauffage va fortement dépendre des sources d'énergie utilisées. On assiste déjà comme dans l'industrie à une perte de parts de marché par les énergies les plus carbonées avec des choix de modes de chauffage dans l'essentiel de la construction neuve utilisant le gaz ou l'électricité.

Plusieurs répartitions du marché peuvent ensuite être envisagées pour réduire les émissions de dioxyde de carbone :

■ Un passage massif au chauffage électrique

Le chauffage électrique n'émet pas de CO₂, a un rendement proche de un et ne participe pas à la pollution de l'air intérieur. Mais, comme les consommations de chauffage sont concentrées dans l'année, elles génèrent des pointes de consommation d'électricité. Actuellement, elles sont d'abord assurées par la production hydraulique puis par des centrales thermiques. Une généralisation du chauffage électrique conduirait à un quadruplement en 2050 de la consommation d'électricité pour des usages thermiques. Puisque la production hydraulique ne peut guère être étendue et que le nucléaire ne peut économiquement assurer des productions de pointe⁸, une part croissante de cette électricité devra être produite à partir de.... combustibles fossiles. Cette voie a donc des limites.

■ Un développement des énergies renouvelables thermiques

Avec les techniques existantes, leur production peut passer de 10 à 25 Mtep et couvrir près de la moitié des besoins thermiques. Il s'agit là probablement d'une limite compte tenu des formes urbaines. On peut situer les potentiels du bois-énergie à 15 Mtep et celui du solaire thermique à 6 Mtep à l'horizon 2050. Les autres sources possibles sont la géothermie et la valorisation des déchets.

■ Un développement de la cogénération

La miniaturisation des matériels de cogénération (moteurs, turbines) permettra bientôt de couvrir tous les niveaux de puissance (jusqu'à la maison individuelle) en utilisant des combustibles fossiles (le gaz le plus souvent) et en associant production de chaleur pour le chauffage et l'eau chaude et production d'électricité de pointe. Ce développement permet d'apporter au réseau électrique une production de pointe, certes à partir de combustibles fossiles, mais avec de très bons rendements.

Les stratégies de division par 4 des émissions devront panacher ces trois options en fonction notamment la structure de la production électrique.

8 - Les besoins de chauffage correspondent en moyenne à 2 500 heures par an soit près de 30 % d'une année. Les analyses de la DGEMP situent la compétitivité du nucléaire à partir des durées annuelles de fonctionnement au-delà de 4 000 ou 5 000 heures. D'autres données internationales les situent à des valeurs encore plus hautes.

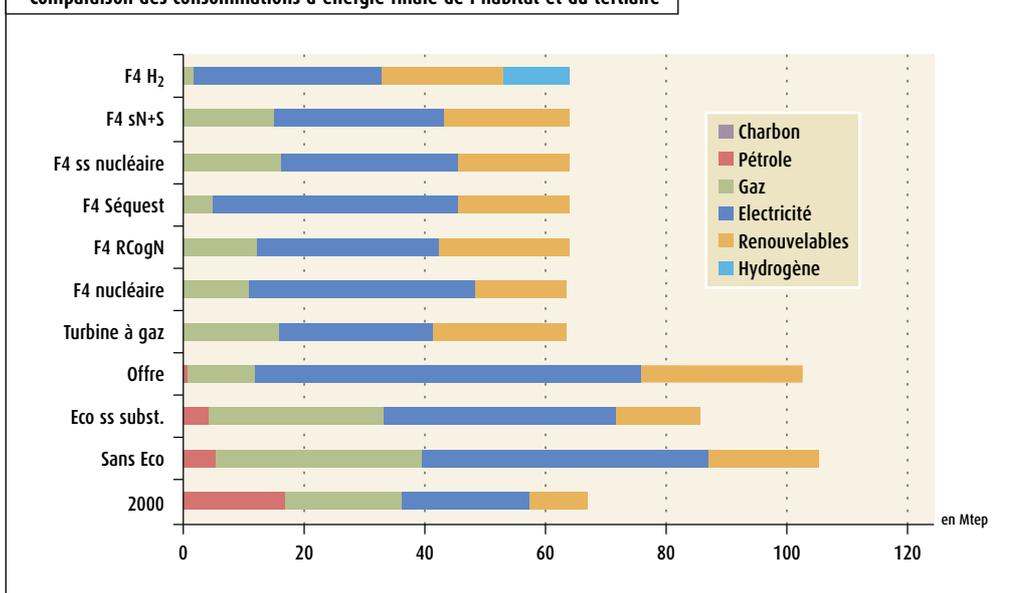
Le résidentiel et le tertiaire consomment en outre de plus en plus d'électricité (éclairage, cuisson, électroménager, électronique de loisirs, équipements professionnels (bureautique, reproduction, télécommunications, internet). Une part croissante de la consommation d'énergie est ainsi constituée d'usages pour lesquels l'énergie est un paramètre mineur lors de la décision d'achat à la différence de l'acquisition d'une voiture ou d'un appareil de chauffage. Les appareils électroménagers comme les équipements de bureau proposés par les constructeurs sont rarement optimisés du point de vue de l'énergie. Des potentiels importants d'amélioration existent donc dans la conception de ces appareils et dans leurs conditions d'usage. En conséquence, un effort massif d'économie d'électricité devra être engagé. On assiste dans ces usages à un gaspillage important par des consommations parasites en dehors des moments d'utilisation réelle (systèmes de veille, régulation insuffisante). Le progrès technique doit investir ces usages diffus aux consommations unitaires certes faibles mais qui font masse.

L'évolution des émissions liées à ces consommations électriques, dont certaines génèrent aussi des pointes de consommation, dépendra de la structure de la production électrique. On doit en outre intégrer le fait que dans un marché électrique européen interconnecté, les économies d'électricité éviteront la sollicitation des sources les plus sales du continent à savoir les centrales au charbon et donc permettre d'importantes réductions d'émissions au niveau communautaire. Il faut à ce stade rappeler que les engagements français souscrits à Kyoto l'ont été au sein de la bulle européenne et se doivent d'être solidaires des autres états européens.

Une projection à 2050 sans effort d'efficacité énergétique conduit à une multiplication par 2,3 des consommations d'électricité spécifique. Les progrès d'efficacité énergétique pourraient ramener cette croissance à 40 %.

En outre, le secteur bâti pourra massivement contribuer à la production électrique par intégration de modules photovoltaïques en toiture et en façade. Le secteur de la construction serait ainsi amené à connaître une double révolution, celle de la qualité (le surcoût de construction étant compensé par la réduction des charges d'énergie) et celle de sa contribution à la production d'électricité par cogénération et par solaire photovoltaïque. On parle alors de « bâtiment à énergie positive ».

Comparaison des consommations d'énergie finale de l'habitat et du tertiaire



En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	0,69	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,03	0,03
Pétrole	16,29	5,47	4,45	1,27	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,02
Gaz	19,61	34,35	28,92	10,91	16,25	10,66	12,52	5,12	17,09	1,82
Electricité	20,96	47,19	38,40	63,58	25,40	37,62	30,10	40,25	25,98	31,71
Renouv.	9,22	18,07	13,64	26,79	21,79	14,92	21,38	18,46	20,92	30,91
Hydrogène										
Total	66,77	105,10	85,43	102,57	63,49	63,25	64,05	63,89	64,03	64,49

Si les efforts sont rapidement engagés, on assisterait donc à une stabilisation de la consommation d'énergie dans le résidentiel-tertiaire, les gains dans le chauffage étant compensés par la croissance des usages spécifiques de l'électricité.

Ainsi dans l'industrie, l'habitat et le tertiaire, il est possible d'absorber l'effet de la croissance économique par des progrès d'efficacité énergétique et de stabiliser les consommations d'énergie. Dès lors, le niveau d'émission de ces secteurs dépendra de la répartition entre les combustibles fossiles, le nucléaire et les renouvelables.

Le secteur des transports présente un défi tout autre.

► Les transports

Le secteur transport combine plusieurs difficultés : croissance forte, totale dépendance à l'égard du pétrole et caractère diffus des consommations d'énergie et des émissions.

Une forte incertitude porte sur l'importance de la croissance de la mobilité. La projection a été fondée sur un rythme moyen de 1,7 % par an identique à celui de la croissance économique⁹. Les facteurs qui génèrent en effet la croissance des trafics resteront puissants dans les décennies à venir pour le transport des personnes comme pour celui des marchandises avec l'aspiration au voyage, la concentration de l'emploi tertiaire et des services dans les agglomérations, le développement de l'habitat pavillonnaire en périurbain, le développement des échanges longue distance et l'exigence de rapidité de livraison. La tendance observée est même à l'accroissement de la place du pétrole du fait de parts de marché croissantes de la route et du transport aérien. Il est donc fait l'hypothèse d'une croissance soutenue d'ici 2020, puis d'un décrochage de la croissance des trafics par rapport à la croissance économique.

Mais, ce n'est donc pas tant la vivacité de la croissance des trafics qui singularise le transport des consommations industrielles, domestiques et tertiaires mais c'est l'absence de tout mouvement de substitution déjà à l'œuvre des énergies carbonées vers des énergies moins carbonées. C'est ce seul fait qui explique que dans la projection à l'horizon 2050 avant tout effort de substitution et d'économie d'énergie les transports représentent les 4/5 de l'accroissement des émissions (voir graphique p. 5).

En conséquence, premier interdit dévastateur, le pétrole ne peut conserver la place qui est la sienne dans un secteur des transports même encore longtemps dominé par le véhicule individuel. Son niveau actuel dépasse déjà largement ce qui sera possible d'émettre en 2050 pour tous les secteurs économiques tandis que tous s'accordent sur une croissance à venir encore forte des trafics. Tous les scénarios de facteur 4 impliquent un niveau maximal d'émissions des transports proche de 10 MtC. Cela n'est possible qu'avec une part du pétrole dans les transports inférieure à 1/3 de l'énergie finale du secteur. Compte tenu de la place irremplaçable du pétrole dans les transports aérien et maritime et le transport routier de marchandises sur moyenne et longue distance, un changement de motorisation des véhicules légers (voitures, camionnettes) avec passage aux biocarburants, à l'électricité voire à l'hydrogène devra s'imposer. Cela va exiger cinq politiques simultanées :

■ Une forte réduction des consommations unitaires des véhicules

Cette réduction va impliquer des progrès techniques dans les moteurs, une optimisation des performances par contrôle électronique mais aussi une redescende en gamme pour rapprocher les véhicules de leur usage réel (diminution de poids, de puissance et de vitesse). L'enjeu : descendre en dessous d'une consommation de 3 l/100 km. Il faut être clair, le véhicule personnel gardera tout son attrait dans les décennies à venir (dans les pays industrialisés et de plus en plus dans les pays en développement) ; il faut donc réussir à concilier cette aspiration à la liberté de déplacement et les contraintes du changement climatique. Un débat doit s'ouvrir. Les marges de manœuvre sont considérables. Il est en effet injustifiable que soit mis sur le marché des véhicules dont la vitesse de pointe est le double de la vitesse autorisée¹⁰. Cette redescende en gamme devra aller de pair avec de meilleurs comportements individuels. Cette première évolution amènera une réduction des coûts alors que les voies de substitution du pétrole aujourd'hui étudiées provoquent toutes d'importants surcoûts.

■ Une contribution croissante des biocarburants

La production de biocarburants comme toute valorisation de la biomasse (bois, biogaz,...) est considérée comme non émettrice de dioxyde de carbone car celui libéré à la combustion est compensé par une absorption lors de la croissance des cultures. Les scénarios visant le facteur 4 prennent tous en compte une production de 8 à 14 Mtep de biocarburants se substituant à du pétrole avec une affectation à leur culture qui peut aller jusqu'au quart de la surface agricole utile¹¹.

■ Le développement de motorisations sans émissions de CO₂ par le véhicule

Le véhicule n'émettant pas de CO₂ existe depuis plus d'un siècle : le véhicule électrique ; mais son développement se solde par un relatif échec. Si la traction électrique est au point depuis longtemps,

9 - Le détail des taux de croissance retenus est le suivant : 1,4 %/an pour le transport routier des personnes, 1,5 % pour celui des marchandises, 1,1 % pour le rail et les transports collectifs et 2,5 % pour l'aérien. Ces taux sont nettement plus faibles que ceux constatés sur la période passée.

10 - Il faut envisager au plan européen un bridage physique des moteurs à un niveau compatible avec les limitations de vitesse. Les experts en évaluent l'effet à une réduction de la consommation de carburant d'un cinquième.

11 - Au plan mondial, une sérieuse limitation des possibilités de développement des biocarburants va découler de la nécessité de nourrir d'ici 2050 50 % de plus de population mondiale sans accroissement significatif des surfaces agricoles. Au-delà de cette contribution des biocarburants, il y a une compétition avec les usages du bois pour le chauffage. La priorité pourrait à terme aller aux biocarburants, le bois étant plus facilement substituable pour les besoins de chauffage.

cette technologie bute sur la médiocre performance du stockage de l'énergie par batterie. L'autonomie des véhicules reste inférieure à 100 km c'est à dire couvrant les petits trajets de type urbains mais pas les autres déplacements ; en outre, la recharge des batteries est lente et doit être généralement effectuée de nuit. Ces contraintes d'utilisation ont bloqué le marché du véhicule électrique à moins de 1 000 véhicules vendus par an. Des batteries plus performances et plus légères arrivent maintenant sur le marché, mais elles sont beaucoup plus coûteuses et les progrès modestes.

Deux grandes voies d'avenir existent. Il est déjà possible de développer la motorisation électrique à travers le véhicule hybride (alors sans perte d'autonomie, ce que permet l'utilisation en appoint du carburant liquide alimentant un moteur thermique classique à côté de la motorisation électrique). Si les véhicules sont plus chers, cette complémentarité permet de réduire la consommation d'énergie, d'ores et déjà de 20 %. Progressivement, la part de l'électricité utilisée pourra croître, notamment grâce à la recharge de nuit sur le réseau électrique. Cette voie a le triple avantage de s'inscrire dans un progrès technique incrémental, de n'impliquer aucun changement de système de transports et d'être économiquement maîtrisable. Toute nouvelle avancée technologique dans le stockage de l'électricité par batterie facilitera cette évolution.

Une autre voie consisterait à développer un vecteur ayant la double qualité de ne générer aucune émission de CO₂ et d'être stockable : l'hydrogène. Mais la production centralisée de cet hydrogène à partir de l'eau par électrolyse consommerait elle-même beaucoup d'énergie. Elle serait apportée par du nucléaire, des renouvelables ou des combustibles fossiles (avec alors obligation de séquestration du CO₂). Il faut en effet écarter l'option de production de l'hydrogène directement à bord du véhicule par réformage à partir d'un combustible fossile parce que cette transformation générerait des émissions de CO₂. Cette voie théoriquement séduisante implique d'importants progrès techniques, des infrastructures coûteuses de transport de l'hydrogène pour desservir les stations service et un surcoût considérable des véhicules. L'horizon de la généralisation au plan mondial d'un tel système de transport se situe dès lors au-delà de 2050. Le marché automobile est maintenant mondial, il n'est pas envisageable qu'il se segmente en fonction des énergies distribuées.

■ **Des transferts modaux notamment vers le rail**

Les enjeux clés d'alternative à la route et au pétrole consistent dans le développement des transports collectifs, des modes doux dans les aires urbaines et celui du transport combiné et du fret ferroviaire pour assurer les échanges internationaux de marchandises. Si leur développement est décisif, le rythme de déplacement des parts modales ne peut être que très lent.

Un doublement des transports publics urbains (et donc près d'un doublement de leurs infrastructures, ce qui n'est pas envisageable en moins d'une génération) ne permettrait de déplacer que 8 % du trafic routier.

L'explosion du transport aérien ne pourra être contenue que par une offre alternative sur des distances comprises entre 500 et 1 200 km que seul le TGV peut assurer.

Eviter la congestion urbaine ou l'engorgement des artères d'échanges internationaux ou de franchissement des montagnes rend indispensable le développement des transports collectifs notamment ferroviaires et donc une relance rapide de l'investissement public.

L'engagement des alternatives à la route doit être d'autant plus rapide que les délais de construction dépassent dix ans.

■ **Une maîtrise de la mobilité par des politiques d'aménagement du territoire et d'urbanisme**

La répartition spatiale des activités (emplois, logements, services, commerces, loisirs) a profité depuis un demi siècle d'un coût décroissant du transport ; il en a résulté un allongement des distances notamment domicile-travail. L'habitat s'étale vers les zones péri-urbaines tandis que l'emploi tertiaire se concentre dans les grandes métropoles. Une optimisation d'ensemble du secteur transport va nécessiter une maîtrise de la mobilité contrainte par une plus grande mixité des fonctions et une relance de la politique d'aménagement du territoire.

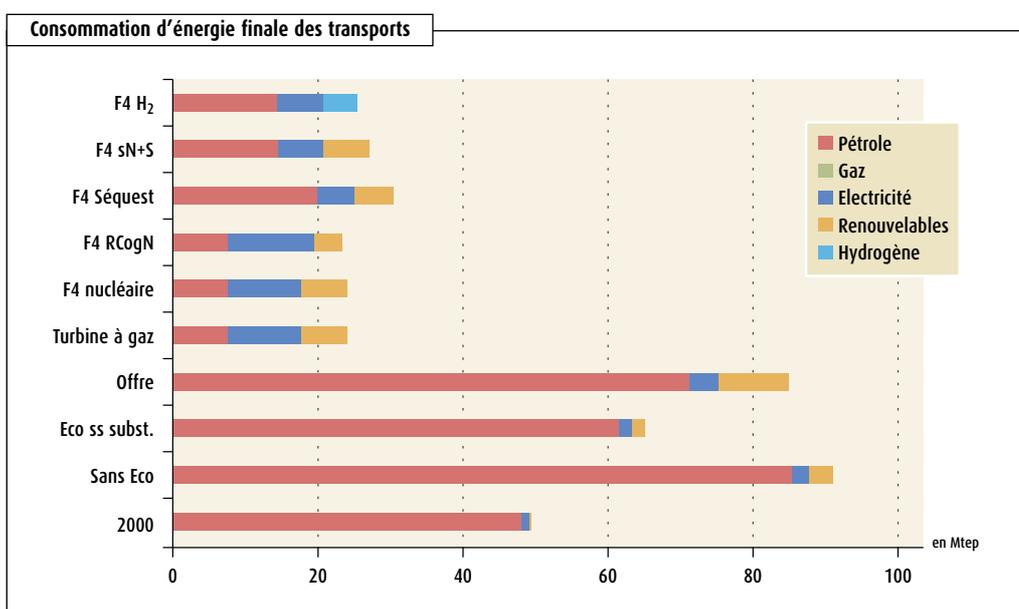
Par ailleurs les nouvelles technologies de l'information et de la communication offrent des opportunités considérables d'évitement de déplacements physiques des personnes (télétravail, échanges personnels) comme des marchandises (transferts de données). Une substitution « de litres d'essence par des octets » réduira fortement les émissions.

Les scénarios de facteur 4 supposent une réduction de la mobilité de 20 % au titre de ces politiques.

Les simulations effectuées montrent que c'est de la performance du secteur transport que va dépendre le plus la lutte contre l'effet de serre, mais les marges de progrès sont importantes puisque que le rendement moyen des voitures ne dépasse aujourd'hui guère 20 % (notamment en cycle urbain).

En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pétrole	48,17	86,06	61,47	70,42	6,77	7,51	7,51	19,8	13,88	14,41
Gaz	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
Electricité	0,9	2,27	2,13	5,5	10,93	10,42	12,02	5,31	7,45	6,76
Renouv.	0,34	2,91	2,08	9,2	7,1	7,1	3,67	5,88	7,44	
Hydrogène										5,78
Total	49,43	91,26	65,7	85,14	24,81	25,04	23,22	31,01	28,78	26,96

En articulant les politiques présentées ci-dessus il devrait être possible d'éviter en France un doublement de la consommation d'énergie par les transports dans le demi-siècle qui vient et même d'obtenir une division par deux sans contrainte majeure sur la mobilité.



Les évolutions présentées marquent une mutation des transports dans le concept des véhicules comme dans les parts modales mais avec une double exigence : celle d'éviter des scénarios futuristes alléchants mais trop coûteux et surtout de permettre une extension au plan mondial.

► L'évolution du secteur de l'électricité

Le secteur électrique français émet actuellement très peu de CO₂ : 10,9 MtC en 2000 pour 34 Mtep en énergie finale puisque le nucléaire et l'hydraulique assurent près de 90 % de la production. Dans les années qui viennent, ce bon bilan va un peu se dégrader puisque la production nucléaire restera stable dans la décennie à venir tandis que la consommation d'électricité va croître à un rythme proche de 2 % par an. Ces besoins supplémentaires pourront être assurés par des énergies renouvelables, par des combustibles fossiles (turbines à gaz, cogénération) ou être compensés par des économies d'énergie.

Avant l'horizon 2050, la totalité des moyens actuels de production thermiques et nucléaires auront été remplacés. Bien évidemment l'hypothèse d'une production à partir de combustibles fossiles par des turbines à gaz sans recours au nucléaire induirait des émissions de CO₂ considérables : autour de 50 MtC¹². Aucun scénario de réduction forte des émissions ne peut, dans ces conditions, être fondé sur la production massive d'électricité à partir des combustibles fossiles, même à partir du gaz naturel. Cela montre la portée limitée de l'effort des pays européens qui tentent de satisfaire à leurs obligations au protocole de Kyoto pour 2010 en se contentant d'une substitution du charbon par du gaz dans leur production électrique. La seule solution évitant un tel interdit et qui permettrait de garder une production électrique significative à partir de combustibles fossiles, même du charbon serait la séquestration du CO₂ émis par les centrales.

Pour l'avenir, deux voies permettent une production d'électricité sans émission de dioxyde de carbone : le nucléaire et les énergies renouvelables. Il faut donc envisager des scénarios qui comprennent des degrés variables de leur contribution.

12 - Calculés sur la base de 64 Mtep d'électricité en 2050 soit le double d'aujourd'hui dans la variante « Turb. gaz » et avec la répartition du mix électrique suivante : turbines à gaz 40 %, cogénération gaz 25 %, renouvelables 30 % et centrales de pointe 5 %.

L'une et l'autre comportent toutefois des limites. Bien évidemment, le fait que le nucléaire n'engendre pas d'émissions de gaz à effet de serre n'efface pas ses risques spécifiques (accident majeur, gestion des déchets, prolifération, vulnérabilité au terrorisme) et ne lui garantit pas une durable acceptabilité sociale. Par ailleurs, dans le cas de substitutions massives vers l'électricité notamment de consommations d'énergie à forte variation horaire et saisonnière (chauffage, éclairage, véhicule électrique) se dégagerait une forte croissance de la consommation électrique en pointe qui ne peut être assurée par l'hydraulique de barrage déjà utilisée à son maximum et par des centrales nucléaires dont l'économie implique un fonctionnement de longue durée dans l'année.

De leur côté, les énergies renouvelables participant à la production électrique peuvent être regroupées en 3 catégories : celles dont la production est intermittente : l'éolien et le solaire photovoltaïque, celles où elle est assez stable dans le temps : l'hydraulique de fleuve, la géothermie haute température, la valorisation des déchets, la cogénération bois, et une dernière où elle est modulable en fonction des besoins : l'hydraulique de lac. A l'horizon 2050, c'est le photovoltaïque qui présente assurément après l'éolien le plus gros potentiel de production. On s'attend à une réduction régulière du coût de production avec vers 2015 une production à 0,15 c € le kWh, soit un coût proche du prix de l'électricité délivrée par le réseau à la clientèle domestique. Pour permettre une diffusion plus massive, il faudra une réduction plus forte des coûts, celle-ci pourra être obtenue grâce à une intégration des cellules photovoltaïques dans la peau même des bâtiments (matériaux de toitures ou de façade, vitrages fixes). Mais la production du photovoltaïque comme celle de l'éolien nécessitera un complément pour garantir une alimentation continue du réseau.

Il y aurait donc un grand intérêt à développer des productions électriques à partir des renouvelables plus constantes dans le temps. Les possibilités du côté de la biomasse sont très réduites car déjà fort sollicitée pour la production de chaleur dans les bâtiments et surtout celle de biocarburants. Comme la production électrique à partir de la biomasse reste à faible rendement (autour de 20 %¹³) à partir de turbines vapeur, leur développement reste limité dans toutes les variantes (moins de 5 % de la production électrique et toujours en cogénération). La production d'électricité est aussi envisageable à l'horizon 2050 à partir de la géothermie profonde, le potentiel est considérable mais à coût élevé. Il pourrait être mis à profit pour ajouter une production de base constante.

Le potentiel de développement des énergies renouvelables, en ne supposant qu'une amélioration des performances et de la rentabilité des filières actuelles sans percée technologique majeure, se situe autour de 44 Mtep en énergie primaire.

Dans l'un et l'autre cas, développement du nucléaire ou développement des renouvelables, il faut donc envisager une production complémentaire à partir de combustibles fossiles. Celle-ci peut être assurée par des turbines à gaz ou, mieux, par de la cogénération dans les secteurs industriel, tertiaire et même résidentiel (notamment avec un recours à des piles à combustible haute température dont le rendement peut atteindre 60 %).

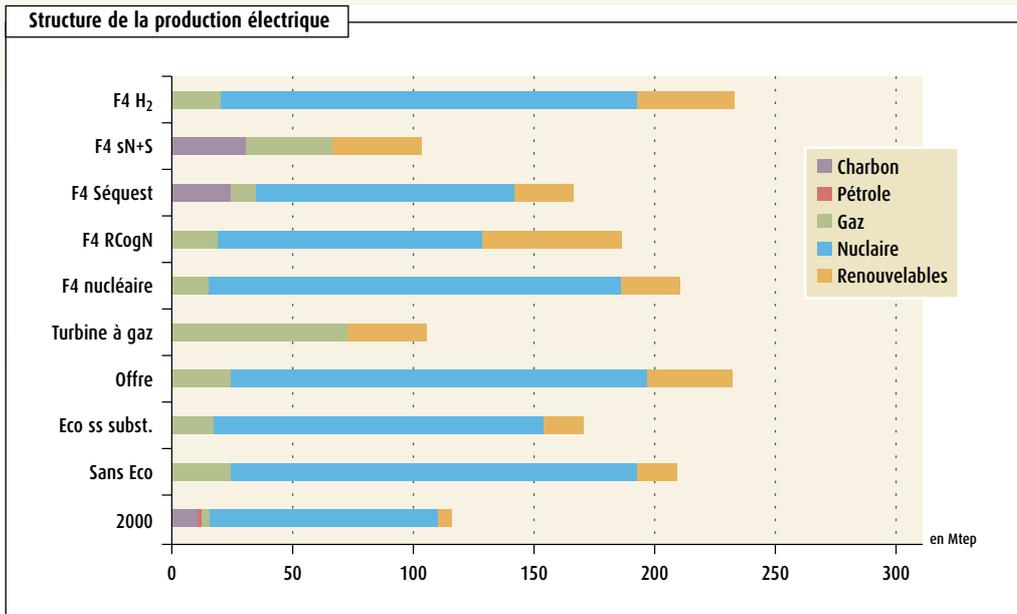
Le tableau suivant donne la répartition de la production électrique.

En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Consommation d'électricité (en énergie finale)										
	11,92	25,07	24,19	26,77	24,77	31,80	28,74	22,64	22,06	30,62
Production électrique (en énergie primaire)										
Charbon	6,69	0	0	0	0	0	0	22,53	30,58	0
Pétrole	1,36									
Gaz	3,49	24,71	19,09	28,84	74,81	14,71	19,24	11,19	34,94	20,62
Nucléaire	102,42	168,07	133,9	168,33	0	174,41	108,93	105,72	0	170,58
Renouv.	6,17	16,56	14,39	31,89	34,21	20,31	58,82	26,64	39,26	40,55
Total	120,12	209,33	167,38	229,07	109,03	209,44	186,99	166,09	104,78	231,76

Les variantes incluant un recours au nucléaire varient entre un maintien de la production au niveau du parc actuel et une croissance de 70 % (variante basée sur le nucléaire ou mise en place d'une filière hydrogène).

Le recours à la séquestration profite surtout au charbon, l'énergie la plus émettrice de carbone mais aussi la plus abondante et la moins chère. Cette diversification est indispensable pour parer toute tension à venir sur l'approvisionnement en gaz, si courtisé.

13 - Des programmes de recherche portent sur la possibilité de produire de l'électricité en couplant un gazéifieur et une turbine à gaz, ce qui permettrait théoriquement d'atteindre des rendements électriques supérieurs à 50%. Compte tenu de la complexité de l'installation de traitement de fumée nécessaire en sortie de gazéifieur, cette technologie exigera des installations de grande puissance peu compatibles avec la structure de la forêt française.

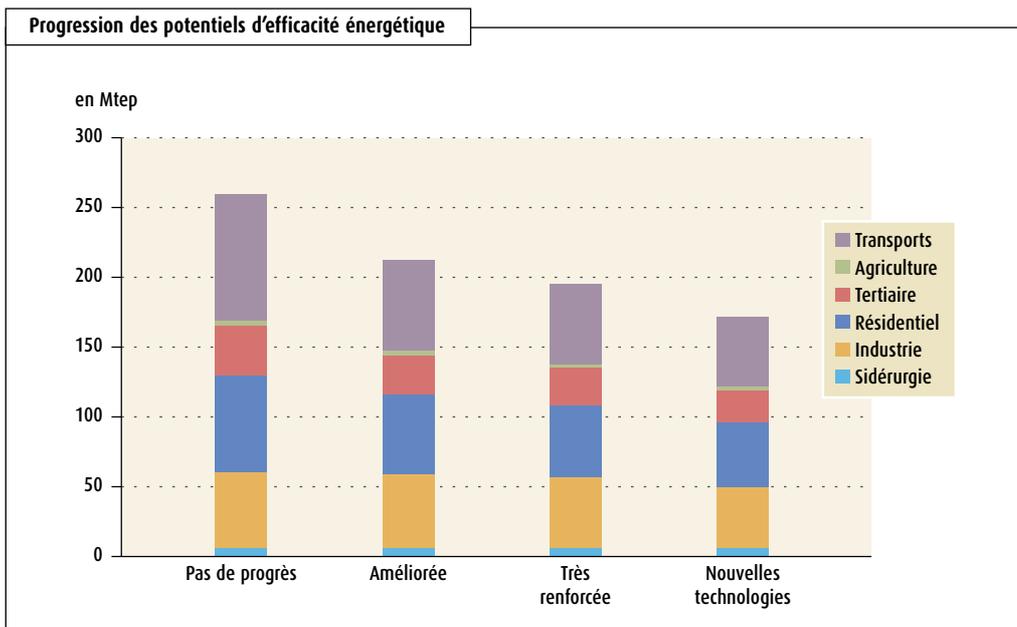


Toutes les variantes de facteur 4, en dehors de celle misant sur le seul nucléaire doivent développer les renouvelables à un niveau proche de leur maximum. Le gaz naturel sert ensuite d'énergie de bouclage. Une production électrique à partir de combustibles fossiles minimale de 15 à 30 Mtep selon les variantes est indispensable pour assurer les pointes de consommation et compléter les productions irrégulières des renouvelables.

Les potentiels d'efficacité énergétique

Après ces présentations sectorielles, le graphique et le tableau suivants présentent les progressions des potentiels d'efficacité énergétique utilisés dans les différentes variantes.

La systématisation des technologies existantes incluant en particulier la réhabilitation thermique de la totalité du patrimoine bâti correspond au niveau d'efficacité très renforcée. Le volume d'économie d'énergie alors réalisé est de 65 Mtep soit un gain moyen de 26 %.



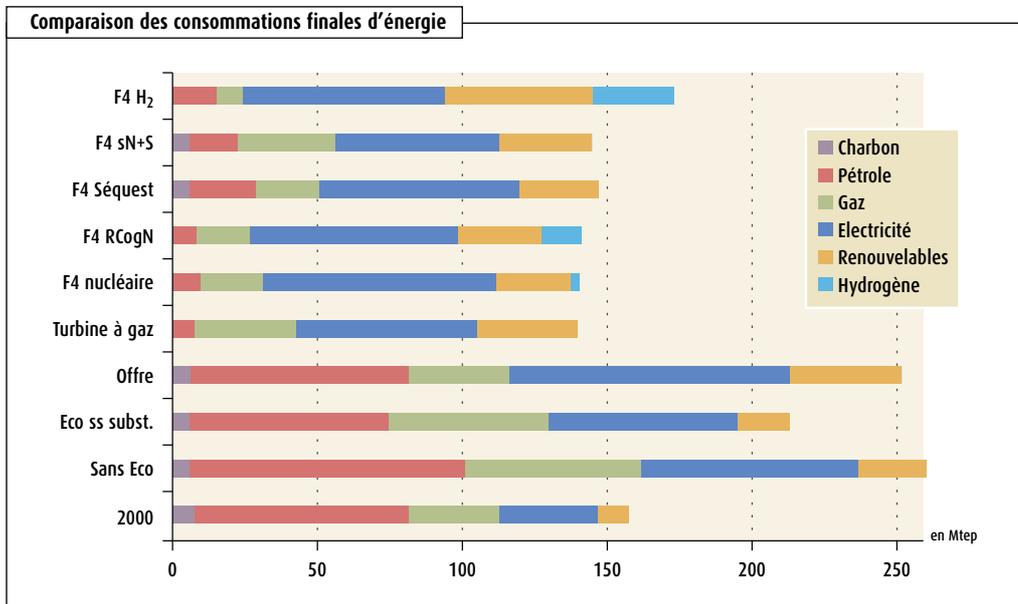
De nouveaux progrès technologiques au-delà des meilleures technologies existantes sont ensuite introduits et permettent une réduction additionnelle de 24 Mtep correspondant à 8 % de la consommation de 2000.

Toutes les variantes de facteur 4 doivent mobiliser la totalité de ces potentiels d'efficacité énergétique.

Energie Finale En Mtep	Pas de progrès	Améliorée	Gains en %	Très renforcée	Gains cumulés en %	Nouvelles technologies	Gains cumulés en %
Sidérurgie	6.26	6.20	1,0	6.01	3,1	5.89	6,0
Industrie	53.98	52.81	2,8	50.44	7,6	43.77	18,9
Résidentiel	69.69	56.80	8,5	52.07	25,3	46.55	33,2
Tertiaire	35.41	28.63	19,1	26.61	24,9	22.95	35,2
Agriculture	3.67	2.89	21,3	2.77	25,5	2.60	29,9
Transports	91.26	65.70	28,0	57.51	37,0	50.09	45,1
Total	260.26	213.03	19,1	195.42	25,9	171.86	34,0

Les profils de consommation d'énergie finale

En conséquence, les 5 variantes de facteur 4 donnent des résultats équivalents en volume global d'énergie finale : entre 140 et 146 Mtep grâce à ces progrès d'efficacité énergétique, soit un niveau un peu plus faible qu'en 2000 (158 Mtep).



En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	7,43	5,60	5,59	5,98	0,06	0,06	0,06	5,79	5,80	0,06
Pétrole	74,23	95,32	68,97	75,36	7,35	9,41	8,11	22,91	16,61	15,24
Gaz	30,98	60,60	55,04	34,82	35,23	21,78	18,51	21,71	33,56	8,68
Electricité	34,02	75,25	65,41	96,65	62,21	80,33	71,64	69,20	56,65	70,09
Renouv.	10,84	23,49	18,02	38,85	34,80	25,95	28,96	27,28	32,10	50,77
Hydrogène						2,89	13,73			28,20
Total	157,50	260,26	213,03	251,67	139,65	140,43	139,65	146,90	144,72	144,83

La consommation d'énergie primaire

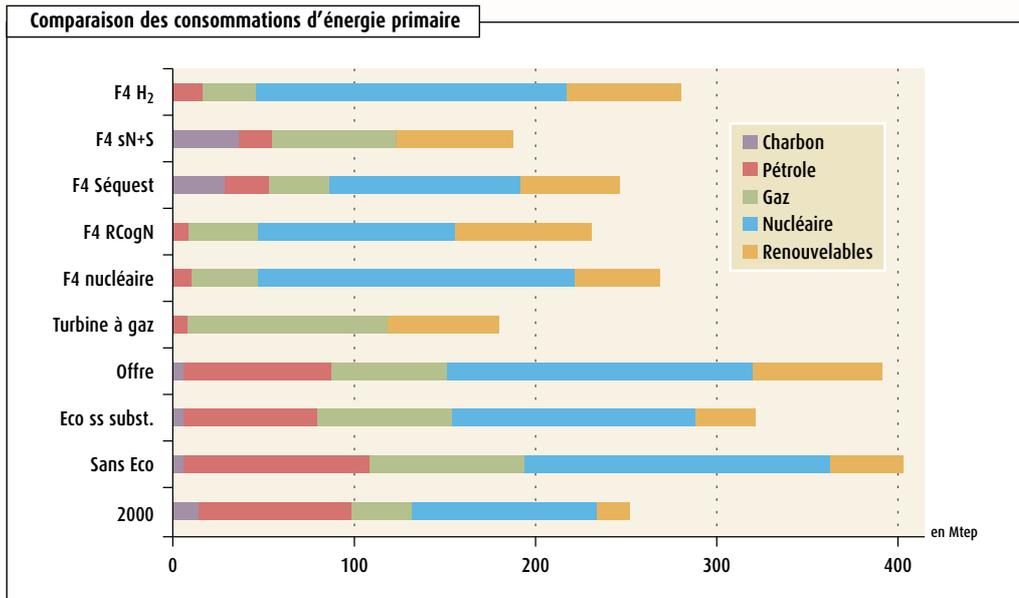
L'évolution par rapport à 2000 est très importante. Pour satisfaire un niveau d'énergie utile d'alors évalué à 86 Mtep, il avait fallu pas moins de 251 Mtep en énergie primaire c'est-à-dire soit 165 Mtep de pertes, soit dans les transformations énergétiques (production électrique, raffinage), soit dans les utilisations finales (rendement des appareils, des véhicules...). Le rendement global du système énergétique était en 2000 de l'ordre de 34 %.

D'ici 2050, les efforts d'économie d'énergie, de substitution vers des solutions plus performantes, de production combinée de chaleur et d'électricité permettront d'accroître ce rendement global. Les scénarios facteur 4 présentent des consommations d'énergie primaire de 260 Mtep en cas de recours

massif au nucléaire (avec un rendement de production qui reste inférieur à 40 %) et de 190 Mtep dans le cas d'utilisation massive de renouvelables et de cogénération à la place du nucléaire. La variante avec production d'hydrogène se solde avec un surcroît de près de 40 Mtep.

Le scénario sans nucléaire présente un rendement global de 75 % du fait d'une valorisation optimale de la chaleur associée à la cogénération tandis que les scénarios avec un fort taux de nucléaire approchent les 60 % ; celui impliquant une filière hydrogène voit son rendement dégradé (48 %) par la double conversion qui impose de produire de l'hydrogène à partir de l'électricité puis souvent l'inverse à l'usage final.

Le graphique ci-dessous donne les résultats des différentes simulations exprimés en énergie primaire.



En Mtep	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCoGN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	14,02	5,60	5,59	5,98	0,06	0,06	0,06	28,32	36,38	0,06
Pétrole	84,01	102,49	74,16	81,03	7,90	10,12	8,72	24,63	17,86	16,38
Gaz	33,28	85,31	74,12	63,67	110,05	36,50	37,75	32,91	68,50	29,31
Nucléaire	102,23	168,07	133,90	168,33	0,00	174,41	108,93	105,72	0,00	170,58
Renouv.	18,17	40,42	32,68	71,81	61,52	47,11	74,95	54,59	64,34	63,13
Total	251,71	401,89	320,46	390,82	179,52	268,20	242,71	246,17	187,09	298,40
Rendement global	34 %	39 %	49 %	40 %	79 %	53 %	59 %	58 %	75 %	48 %

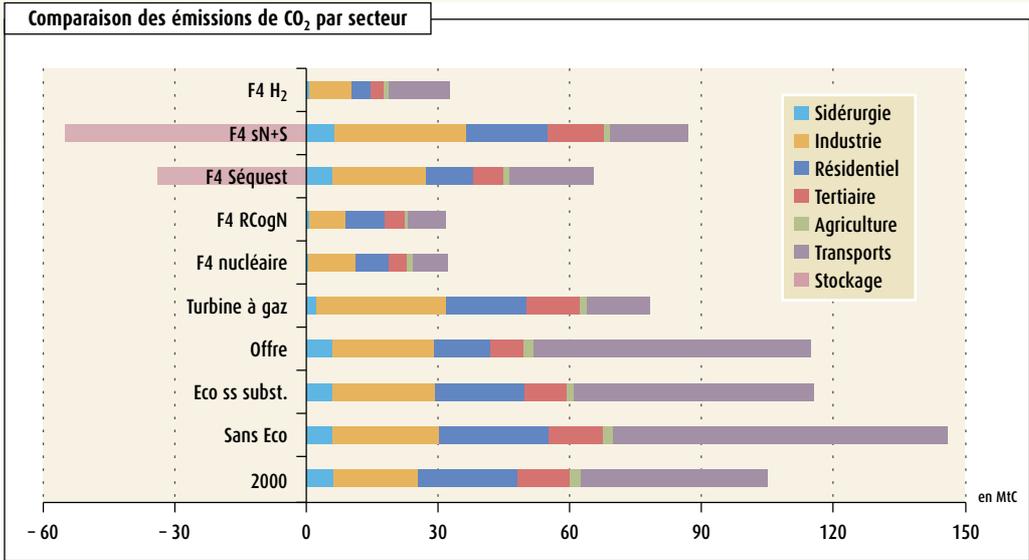
Toutes les simulations prolongeant la tendance de recours au nucléaire présentent une proportion d'énergies carbonées inférieure à 50 %.

Avec la simulation facteur 4 nucléaire, elle chute à 17 % (65 % de nucléaire et 18 % de renouvelables). La simulation avec séquestration maintient une place plus importante aux combustibles fossiles avec 35 %. Dans la variante sans nucléaire avec séquestration, les renouvelables assurent 35 % de l'approvisionnement et les combustibles fossiles 65 %.

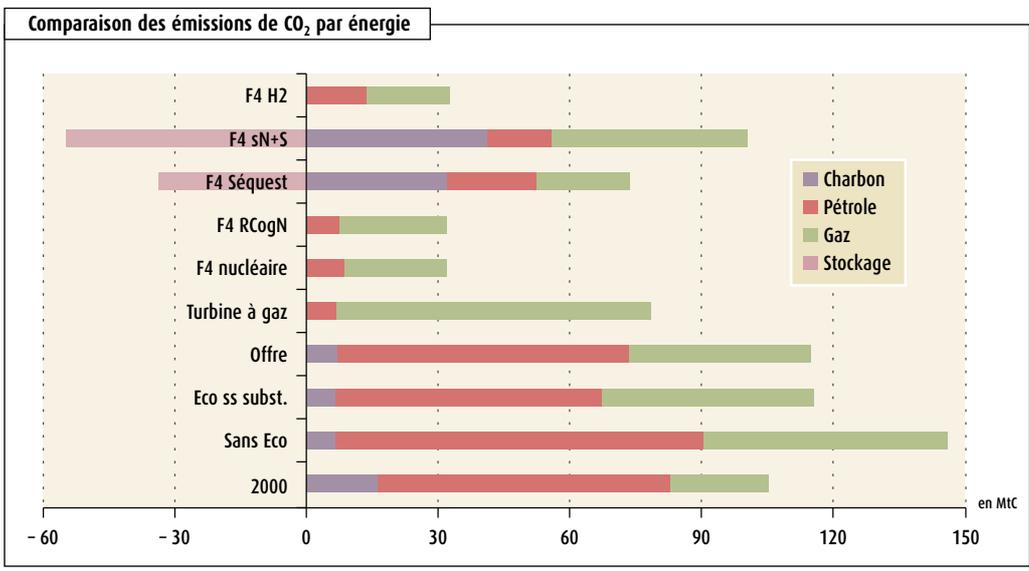
Les émissions de dioxyde de carbone

Dans le graphique présentant les émissions de dioxyde de carbone par secteurs, on mesure l'effet des actions dans les transports pour aboutir à une division par 4 des émissions avec 32 MtC en 2050.

Les variantes avec séquestration disposent de beaucoup plus de souplesse que les autres. Elles atteignent les objectifs finaux avec un niveau d'émission proche du double avant séquestration. Cette souplesse est particulièrement profitable au secteur des transports et à l'industrie lourde. Le niveau de séquestration ici pris en compte avoisine le maximum possible dans la variante de sortie du nucléaire avec recours à la séquestration en stockant 88 % des émissions produites par les consommations de pétrole et de charbon dans l'industrie et par la production électrique.



En MTC	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 Hydrogène
Sidérurgie	6,11	5,89	5,85	5,88	2,24	0,40	0,55	5,81	6,26	0,58
Industrie	19,26	24,32	23,31	23,05	29,54	10,82	8,37	21,46	30,08	9,71
Résidentiel	22,76	24,96	20,43	12,84	18,21	7,36	8,72	10,67	18,66	4,30
Tertiaire	11,88	12,39	9,68	7,79	12,35	4,14	4,74	6,93	12,61	3,02
Agriculture	2,45	2,15	1,66	2,15	1,40	1,58	0,73	1,25	1,41	0,98
Transports	42,77	76,38	54,62	63,17	14,55	7,87	8,72	19,34	18,01	14,02
Stockage								- 33,63	- 54,68	
Total	105,23	146,08	115,54	114,88	78,30	32,17	31,83	31,84	32,35	32,61



En MTC	2000	Sans Eco	Eco sans substitution	Offre	Turbine à gaz	F4 nucléaire	F4 RCogN	F4 Séquest	F4 sN+S	F4 hydrogène
Charbon	16,20	6,42	6,40	6,92	0,07	0,07	0,07	32,02	41,08	0,07
Pétrole	66,56	84,04	60,81	66,44	6,48	8,30	7,15	20,20	14,65	13,43
Gaz	22,47	55,62	48,33	41,51	71,75	23,38	24,61	21,46	44,66	19,11
Stockage								- 33,63	- 54,68	
Total	105,23	146,08	115,54	114,88	78,30	32,17	31,83	31,84	32,35	32,61



Les enseignements des différentes variantes

■ Avec une hausse de 39 % des émissions de dioxyde de carbone (146,08 MtC à comparer aux 105,23 MtC de l'année 2000), la projection tendancielle 2050 de base avant prise compte des économies d'énergie et des mouvements de substitution présente une croissance des émissions nettement plus faible que le PIB (130 %). Cela découle d'abord d'un changement de contenu de la croissance : davantage d'industries manufacturières et moins d'industries lourdes, saturation des usages thermiques dans l'habitat et le tertiaire et développement des usages électriques ainsi que de l'attrait constaté du gaz et de l'électricité en remplacement du charbon et du pétrole. Mais, cette variante n'est pas seulement intéressante à analyser dans son niveau, elle l'est aussi dans sa répartition. Les émissions des industries, du résidentiel-tertiaire croissent en effet très peu (+ 19 % dans l'industrie, + 8 % dans le résidentiel et le tertiaire), l'accroissement est essentiellement le fait des transports : + 79 %. D'où la mutation inévitable de ce secteur.

■ Une simulation complémentaire a été en outre effectuée en figeant les parts de marché des énergies à leur situation de 2000 (dans les usages finaux comme dans la production électrique). Il en aurait résulté l'émission de 161,5 MtC (avec alors les croissances suivantes par secteurs : industrie + 28 %, résidentiel-tertiaire : + 31 % et transports + 87 %). Par différence avec le cas précédent, c'est dans le chauffage des bâtiments que l'effet du recul spontané des énergies les plus carbonées est le plus sensible. Les mouvements spontanés de substitution se traduisent ainsi par une réduction de 15,4 MtC, ce qui est considérable.

■ Les deux stratégies partielles qui consistent soit à développer les économies d'énergie, sans modifier les parts de marché des énergies soit au contraire à développer les sources d'énergie non carbonées (hors transports) sans rechercher des économies d'énergie (sans volontarisme) aboutissent à des résultats comparables : autour 115 MtC. Ils ne permettent que d'enrayer la croissance des émissions. On doit en conclure que le développement des économies d'énergie comme celui des énergies non carbonées constituent deux incontournables pour envisager de meilleures performances. Mais aucune de ces deux options n'est suffisante.

■ Le développement du nucléaire dans la production électrique ne suffit pas à réduire fortement les émissions, pour preuve la situation actuelle où le bénéfice d'une saturation de la part du nucléaire dans la production d'électricité est compensé par les mauvaises performances des autres énergies. La variante de facteur 4 avec nucléaire doit donc ses performances à un effort d'électrification des transports, à la mobilisation de tous les potentiels d'efficacité énergétique mais aussi au recours aux renouvelables pour contribuer aux besoins thermiques et réduire les pointes de consommation d'électricité. Avec 32 MtC, il parvient à la division par 4 grâce à une croissance du parc nucléaire de 71 %.

■ Dans un scénario de sortie du nucléaire sans séquestration du carbone, la contribution du nucléaire ne peut être remplacée en totalité par les énergies renouvelables du fait de leurs limites en potentiels et en conditions de production (variabilité, intermittence). Un recours même très optimisé aux combustibles fossiles fait nettement rater l'objectif de division par 4 avec l'émission de 67 MtC.

■ La variante avec séquestration du carbone et recours au nucléaire dispose d'une marge de manœuvre accrue : maintien de fortes contributions du charbon dans l'industrie lourde et place des carburants liquides accrue dans les transports. Ce réglage permet d'obtenir les 32 MtC visés tout en ayant un secteur des transports encore alimenté aux 2/3 par du pétrole et une part du nucléaire dans la production électrique qui se situe à 64 %.

■ La variante de sortie du nucléaire qui bénéficie des possibilités de séquestration parvient aussi à la division par 4 des émissions avec un approvisionnement énergétique réparti par tiers entre les renouvelables, le gaz et le charbon.

■ La mise en place d'une filière hydrogène impose une hausse de la production électrique de 10 % et donc une part massive de nucléaire. L'hydrogène est utilisé dans l'industrie et le résidentiel-tertiaire pour des usages thermiques directs et dans les véhicules en utilisant des piles à combustibles pour alimenter des moteurs électriques.

■ En outre, il aurait été possible de marier la variante avec séquestration et celle avec la filière hydrogène. C'est le choix stratégique dans lequel s'engage les Etats-Unis, riches à la fois de leurs ressources charbonnières et de leurs gisements pétroliers épuisés et donc convertibles en stockages de dioxyde de carbone. Mais il est bien plus économique de stocker le carbone directement émis par des centrales charbon (alimentant notamment des véhicules électriques) que de produire de l'hydrogène avec ces centrales pour alimenter les mêmes usages. La dégradation des rendements induite alourdirait fortement le volume et le coût de la séquestration du carbone.



La hiérarchisation des choix

De toutes ces simulations complexes et contrastées se dégagent des enseignements robustes.

Les points durs

La réduction des émissions de CO₂, ne peut être homogène entre les secteurs. Il est des usages pour lesquels des énergies non carbonées peuvent aisément être substituées à des combustibles fossiles, par exemple la majorité des usages thermiques. Mais il y a des usages où il n'existe pas aujourd'hui de vraies alternatives. C'est vers ces usages qu'il faudra concentrer les consommations de combustibles fossiles pour éviter de paralyser des secteurs d'activités. Ils sont de deux types :

Le transport sur longue distance

Le transport maritime, le transport de marchandises par camion sur moyenne et longue distance et surtout le transport aérien se passeront très difficilement de pétrole (à la limite, les seules alternatives seraient les biocarburants ou un vecteur hydrogène).

Des usages où seule une énergie aisément stockable permet une adaptation immédiate aux variations de la demande

Cela concerne essentiellement les usages thermiques quand les énergies renouvelables ou l'électricité ne peuvent satisfaire la demande et surtout la production électrique de pointe quand le nucléaire est trop coûteux et la production des renouvelables aléatoire.

Les interdits

La présentation des évolutions nécessaires par secteurs consommateurs et dans la production électrique a mis en évidence des interdits :

- utilisation massive de combustibles fossiles pour la production d'énergie thermique dans l'industrie l'habitat et le tertiaire,
- une production électrique à flamme même par turbines à gaz,
- un secteur transport dépendant du pétrole.

Une seule de ces options retenue dans un scénario le fait inévitablement échouer.

Mais parmi les interdits, le plus grave serait l'attente pour ce qui concerne la construction des infrastructures. La réhabilitation thermique des bâtiments et les transports sont caractérisés par des inerties très fortes. Les espérances de vie moyennes du parc bâti et des infrastructures de transport sont de l'ordre du siècle. Les politiques les concernant doivent être mises en place rapidement.

Les incontournables

Symétriquement aux interdits, il y a des incontournables, des options obligatoires s'imposant à toutes les variantes (indépendamment des parts de marché entre énergies).

Une efficacité énergétique maximale

Tous les scénarios sont très sensibles au niveau des consommations. Les progrès de maîtrise de l'énergie doivent être généralisés dans tous les secteurs. En outre, il serait vain d'espérer des changements de comportements si les appareils restent de performance médiocre, leur régulation et leur gestion de mauvaise qualité.

Cette nécessité d'efficacité énergétique concerne aussi le secteur électrique même avec développement massif du nucléaire car un basculement d'une part majoritaire des usages thermiques, un développement massif d'usages diffus concentrés sur la pointe de consommation et une alimentation croissante en électricité du secteur des transports poseront des défis lourds d'équilibre au réseau et nécessiteront une part de production thermique pour assurer les ajustements avec souplesse.

Une amélioration des comportements

Dans le résidentiel-tertiaire, l'amélioration des comportements découlera d'une plus grande attention dans la vie quotidienne et d'une assistance accrue de l'électronique pour réguler les consommations d'énergie, notamment d'électricité, sans pour autant nécessiter un bouleversement des modes de vie.

Dans cette quête d'une plus grande efficacité énergétique, le secteur transport présente seul la singularité de nécessiter une mutation profonde des habitudes... si l'on veut garder pour objectif la liberté

de déplacement. Utiliser davantage les transports en commun, choisir un véhicule plus petit donc plus économe, adopter une conduite plus souple, privilégier le train sur l'avion sont autant de comportements indispensables. Les acteurs y sont-ils prêts ?

Cette optimisation des comportements rend indispensable une politique publique de maîtrise de la mobilité dans les choix d'urbanisme, d'aménagement du territoire et de raccourcissement des chaînes logistiques des entreprises à la fois pour réduire les émissions, prévenir des chocs pétroliers et éviter la saturation des infrastructures.

■ La réorientation de la politique des transports

La tendance actuelle vers la montée en gamme des véhicules, la priorité accordée à la route, l'insuffisance des investissements dans les infrastructures de transports publics conduisent à l'impasse. Aucun scénario de facteur 4 n'est envisageable sans une réduction très forte des consommations pétrolières dans les transports, essentiellement au profit des transports électriques.

■ Le développement des renouvelables

Cette catégorie des incontournables inclut le développement des énergies renouvelables. Celles-ci permettent une diversification du système énergétique, accroissent l'indépendance énergétique, assurent la relève des combustibles fossiles dans des usages thermiques et dans les transports, participent à la production électrique et désensibilisent le secteur électrique aux variations des prix. Si leur contribution est parfois limitée et irrégulière, elle n'en est pas moins indispensable.

Cette catégorie des actions incontournables ne regroupe que des politiques sans effet de déplacement de pollution ni de risque significatif. Un accord doit être aisément réalisable pour les engager.

▣ Les ruptures technologiques

La réalisation d'une division par 4 des émissions serait grandement facilitée si 4 percées scientifiques majeures étaient réalisées dans les décennies à venir.

■ La technologie au service des comportements

Une sobriété dans l'utilisation de l'énergie au quotidien ne sera pérenne qu'à la condition que la technologie vienne assister les comportements. Les progrès dans les domaines des capteurs, de l'informatique et de la téléphonie mobile devraient être mobilisés pour optimiser les consommations d'énergie et réduire les gaspillages. Il faut tendre vers une adéquation des consommations au plus près des besoins : avec modulation du chauffage en fonction de l'occupation, mise en veille performante ou en coma des appareils électriques en dehors de leurs heures d'utilisation,...

■ Le stockage de l'électricité

La question du stockage de l'électricité mobilise les scientifiques depuis déjà deux siècles et reste l'une des clés de l'évolution du système énergétique. Si l'on parvient à stocker l'électricité pour en moduler l'utilisation sur de courtes périodes, c'est le véhicule électrique qui verra son marché s'ouvrir rapidement. Si des progrès sont réalisés dans le stockage massif de l'électricité, c'est l'intégration dans le réseau électrique de productions discontinues notamment renouvelables qui se trouvera facilitée.

■ La séquestration du carbone

Les recherches engagées portent sur la capacité à stocker le CO₂ après capture dans les fumées puis transport par gazoduc vers le lieu d'injection en sous-sol. Elle contient toutefois une limite : la capture, l'opération la plus coûteuse, n'est envisageable que pour des installations consommant de l'ordre de 100.000 tep par an. La séquestration concernerait ainsi essentiellement la production électrique, le raffinage, la sidérurgie, des cimenteries et la chimie lourde, soit au maximum 25 MtC sur les 105 MtC émis en 2000.

Les sites de stockage de CO₂ les plus adaptés sont ceux qui garantissent un réel confinement (gisements pétroliers et gaziers, certains aquifères profonds). D'autres solutions présentent davantage de risques : les gisements charbonniers profonds non exploités ou les aquifères non confinés. Pour la France les possibilités de séquestration se situent dans le Bassin Parisien, le Bassin Aquitain, la vallée du Rhône et surtout les gisements d'hydrocarbures et les aquifères profondément enfouis dans le plateau continental sous la Mer du Nord.

Le développement de la séquestration du CO₂ constitue un enjeu déterminant. Qu'il soit rapidement maîtrisé et des marges de manœuvre se créent pour faciliter la mutation des transports, garder un appoint de production électrique et de chaleur à partir des combustibles fossiles. Qu'il s'avère difficile à maîtriser et surtout trop coûteux et la « décarbonisation de l'économie » deviendra un changement de civilisation plus difficile.

■ Le passage à une économie de l'hydrogène

Le concept du passage d'une économie énergétique à base de carbone à une suivante à base d'hydrogène est alléchant. La matérialisation de cette hypothèse va en pratique dépendre des deux points qui précèdent. Que des progrès massifs soient réalisés dans le stockage de l'électricité et dans la séquestration du carbone et la construction d'une économie de l'hydrogène perdra de son attrait. Elle suppose en effet d'être capable de produire l'hydrogène sans émettre de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et de constituer un réseau de distribution de l'hydrogène. On a également vu que cette option avec en amont une production d'électricité nucléaire s'accompagne d'une dégradation de rendement et d'importants surcoûts par rapport à un usage direct de l'électricité.

L'avenir est ouvert. On pourra toutefois méditer sur la façon dont la nature a « géré le problème ». D'une atmosphère originelle composée de dioxyde de carbone et de méthane, le monde vivant a produit une atmosphère composée d'oxygène et d'azote tout en continuant d'assurer ses transferts d'énergie à partir du cycle du carbone via la photosynthèse et la respiration. La stabilisation du climat n'a pas débouché sur une décarbonisation mais sur une gestion d'un cycle où les émissions sont équilibrées par les absorptions. Il y a là un champ inédit d'investigation pour les économistes. Quel modèle est le moins coûteux, un cycle du carbone avec stockage ou une filière hydrogène ? En tous cas, l'analogie pousse à s'intéresser sérieusement à la séquestration du carbone.

► Des espaces de choix réels

■ Le choix entre les énergies non carbonées, nucléaire ou renouvelables

La question des espaces de choix renvoie à un débat difficile, celui de la place du nucléaire. Cet exercice oblige d'ailleurs à le relativiser. Cette source d'énergie contribue aujourd'hui en France à 17 % de la consommation finale d'énergie et accapare près de 100 % du débat (et pas loin des crédits publics). Il n'y pas de division par 4 des émissions possible sans effort massif d'économie d'énergie, de développement des renouvelables et de mutation du secteur des transports. Mais même avec toute cette palette, un scénario 2050 centré sur le nucléaire reste dépendant d'une seule source d'énergie, de la pérennité de sa maîtrise technologique et handicapé par sa difficulté à devenir un standard mondial en excluant les pays pauvres ou instables.

Des scénarios sans nucléaire doivent aussi naviguer entre des contraintes fortes : exigence très élevée d'efficacité énergétique et de sobriété des comportements, développement réussi des énergies renouvelables aux plans technologiques et économiques. Ils nécessitent de réussir à réduire les coûts de la production électrique photovoltaïque. Faut de cela, ces scénarios dépendraient encore davantage de la capacité à séquestrer le carbone.

Il est essentiel pour la clarté du débat sur le climat qu'une stricte équivalence soit respectée entre les différentes énergies non émettrices de gaz à effet de serre, et que le choix repose sur un débat nourri de leurs possibles contributions au fur et à mesure des avancées réalisées ou des obstacles rencontrés.

■ Les limites de l'attrait du gaz naturel par rapport aux autres combustibles fossiles

Une autre marge de manœuvre réside dans le remplacement du pétrole et du charbon par le gaz naturel. Dans l'immédiat, pour la transition qui s'engage, tous les pays développent l'utilisation du gaz naturel. L'amour immodéré dont il fait l'objet (meilleur rendement et contenu en carbone plus faible que les autres combustibles fossiles) pourrait très bien mal finir. L'industrie gazière nécessite des infrastructures de transport autrement lentes à mettre en place et coûteuses que le pétrole. Les décennies qui viennent pourraient être simultanément marquées par une hausse des prix du pétrole, qui malmènerait surtout le secteur des transports, et par une hausse des prix du gaz qui réduirait les possibilités de réduction des émissions par un passage au gaz et imposerait des transformations énergétiques plus profondes pour réduire les émissions.

Analyse économique des stratégies de facteur 4

Dans l'analyse globale ici conduite, il n'est pas possible de comparer les performances économiques des différentes filières et des technologies. Mais une autre approche est possible, à partir de l'évolution de la dépense énergétique des agents économiques.

Le poids de l'énergie dans l'économie

Il est à ce stade indispensable de revenir sur l'impact économique des trajectoires décrites. Trois paramètres sont à prendre en compte pour apprécier l'impact économique futur :

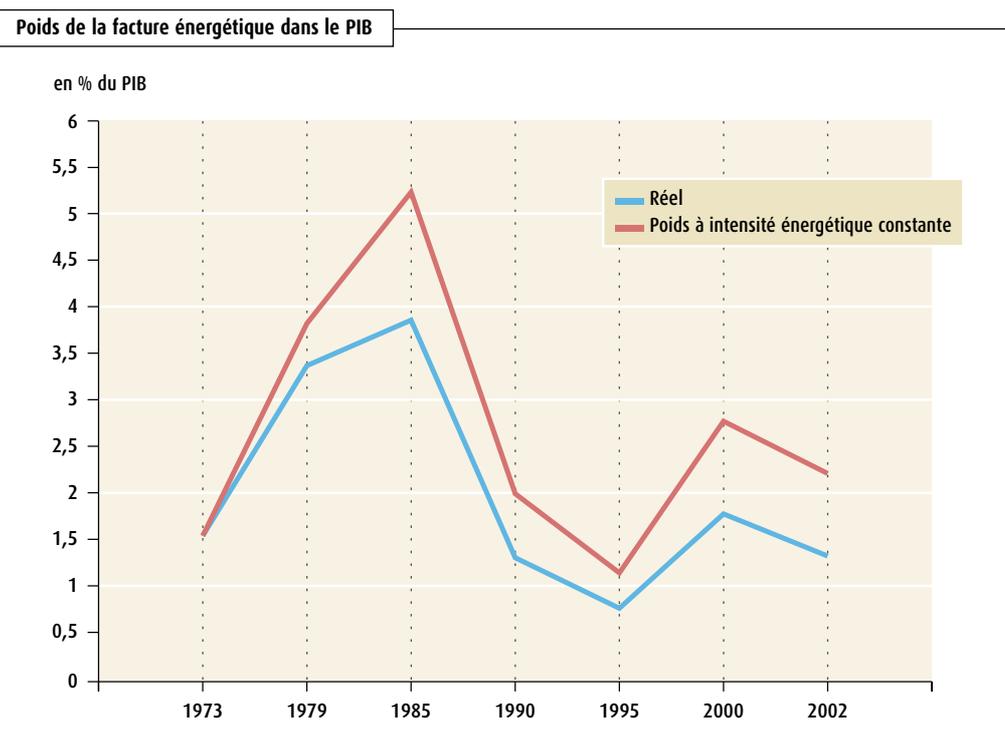
- L'évolution du prix des énergies dans le demi-siècle qui vient (hausse du prix des hydrocarbures notamment), même si la lutte contre l'effet de serre va avoir pour effet de ralentir la demande énergétique mondiale de combustibles fossiles et donc de détendre les prix (surtout quand les ressources les moins chères viendront à se tarir).
- La valeur du carbone que l'économie prendra en compte d'une façon ou d'une autre (fiscalité, mécanismes de flexibilité, internalisation volontaire par les acteurs économiques) et qui viendra s'ajouter aux prix actuels.
- L'évolution de l'intensité énergétique du PIB. Si l'utilisation de l'énergie devient plus efficace, le poids de la dépense énergétique dans la valeur ajoutée va s'alléger et tout ou partie du surcoût de la lutte contre l'effet de serre sera absorbé du fait de l'amélioration des rendements.

Le coût de la lutte contre l'effet de serre est la résultante de ces trois variables et ne doit donc surtout pas être interprétée à partir de la seule valeur de la tonne de carbone.

Le graphique qui suit retranscrit l'évolution passée en la matière, hors deuxième composante, la valeur du carbone ayant été nulle jusqu'à présent.

La courbe bleue exprime en % du PIB la facture énergétique de la France à travers ses importations. Cette valeur prend en compte les variations des prix à l'importation ainsi que l'évolution de l'indépendance énergétique puisque la part relative des combustibles fossiles a fortement décru depuis 1980 avec le déploiement du parc nucléaire.

La courbe rouge réévalue cette évolution en effaçant l'amélioration de l'intensité énergétique finale réalisée depuis 1973 (mais avec la même répartition entre énergies). On peut ainsi constater que, sans ces progrès d'efficacité énergétique dans les usages finaux de l'énergie, le poids de l'énergie dans l'économie française aurait été nettement plus élevé. Alors que la facture énergétique payée en devises représentait en 2000 1,7 % du PIB, elle aurait été de 2,7 % soit 56 % plus élevée. Les efforts passés ont ainsi dégagé une véritable rente de maîtrise de l'énergie.



► L'évolution de la dépense énergétique selon les variantes

A l'avenir, une hausse de la valeur du carbone serait sans effet dommageable sur l'économie si elle était compensée par une baisse dans les mêmes proportions de la dépense énergétique (qui elle-même prendrait en compte l'évolution du prix des énergies et le rythme de progression de la demande). On appellera dépense énergétique dans la démonstration qui suit, la somme des factures d'achat d'énergie acquittées par les différents acteurs économiques français, exprimée hors taxes. Cette dépense prend en compte le coût des importations en devises, l'amortissement des investissements consentis dans le secteur énergétique et les coûts salariaux. La fiscalité, qu'elle consiste en la TVA ou en accises comme la TIPP n'est pas prise en compte car elle n'est pas une dépense mais un transfert financier que l'Etat décide pour assurer ses dépenses à partir de ses recettes fiscales¹⁴.

On peut calculer quelle serait l'évolution de cette dépense énergétique par rapport à l'évolution du PIB.

A la lumière des scénarios de facteur 4 on peut faire le calcul suivant :

- Dans la variante de base sans effort d'efficacité énergétique ni mouvement de substitution, la consommation d'énergie finale augmenterait de 65 % (260 Mtep) ; dans les variantes de facteur 4, cette consommation d'énergie finale se contracterait autour de 140 Mtep du fait des efforts de maîtrise de l'énergie. On peut calculer la dépense énergétique correspondant à chaque variante en multipliant les prix moyens des énergies de chaque catégorie d'usage par les quantités d'énergie finale de chaque usage.
- Cette dépense énergétique a été de 79,8 milliards d'euros en 2000. Elle serait de 144,4 Md€ dans la variante sans maîtrise de l'énergie et de 67,4 Md€ dans une variante de facteur 4 retenue ici pour la démonstration par son mix énergétique équilibré baptisée « F4 RCogN », celle intermédiaire incorporant renouvelables, cogénération et un solde nucléaire. Sa consommation d'énergie finale est de 140,4 Mtep.

Ces charges énergétiques hors taxes ont dans un premier temps été calculées avec les prix de chaque énergie en 2000¹⁵ (soit une valeur moyenne de la tep de 555 € dans le premier cas sans maîtrise de l'énergie et de 480 € dans le second)¹⁶.

► Calcul de la valeur du carbone permettant de mettre en œuvre les variantes de facteur 4

La variante de facteur 4 prise comme référence aboutit à une économie de dépense énergétique par les agents économiques de 77,0 Md€ par rapport à celle sans maîtrise de l'énergie. Cette moindre dépense peut soit être absorbée par une hausse des cours des énergies importées soit servir à financer les politiques d'économie d'énergie, de substitution d'énergie ou de réorganisation des transports.

Dans un premier temps, excluons la prise en compte d'une hausse des prix des énergies d'ici 2050, cette économie de 77,0 Md€ peut être utilisée pour financer les actions de maîtrise de l'énergie et de réduction des émissions de carbone. On peut donc rapporter cette moindre dépense aux quantités de carbone évitées entre les deux variantes (114 MtC) et en déduire une valeur du carbone en dessous de laquelle, il reste un avantage économique à investir dans la maîtrise de l'énergie. Cette première valeur du carbone qui correspond à une stabilité de la dépense énergétique en 2050 entre la variante sans maîtrise de l'énergie et celle de facteur 4 ici étudiée est de 675 €/tC (ou 184 €/tCO₂).

► Valeur du carbone obtenue à poids constant de l'énergie dans le PIB

Le calcul qui précède était fondé sur une équivalence de la dépense énergétique en 2050 en référence à la dépense énergétique de la variante sans maîtrise de l'énergie. Le même raisonnement peut être effectué par rapport à la situation 2000, en supposant un poids constant de la dépense énergétique dans le PIB sur 50 ans. Les 79,8 Md€ de charge énergétique 2000 projetés en 2050 avec un PIB en hausse de 130 % donnerait une dépense énergétique proportionnelle de 183,5 Md€/an. Ce calcul est encore effectué en gardant en 2050 les tarifs des énergies de 2000.

La variante sans maîtrise de l'énergie présentait une dépense énergétique de 144,4 Md€ en suivant une progression plus faible que le PIB, et dégagerait ainsi une marge de 39,1 Md€. Dans le scénario de facteur 4, la réduction de la consommation d'énergie finale qui chute de 260,3 Mtep à 126,7 Mtep élargit cet écart de moindre dépense énergétique à 116,1 Md€.

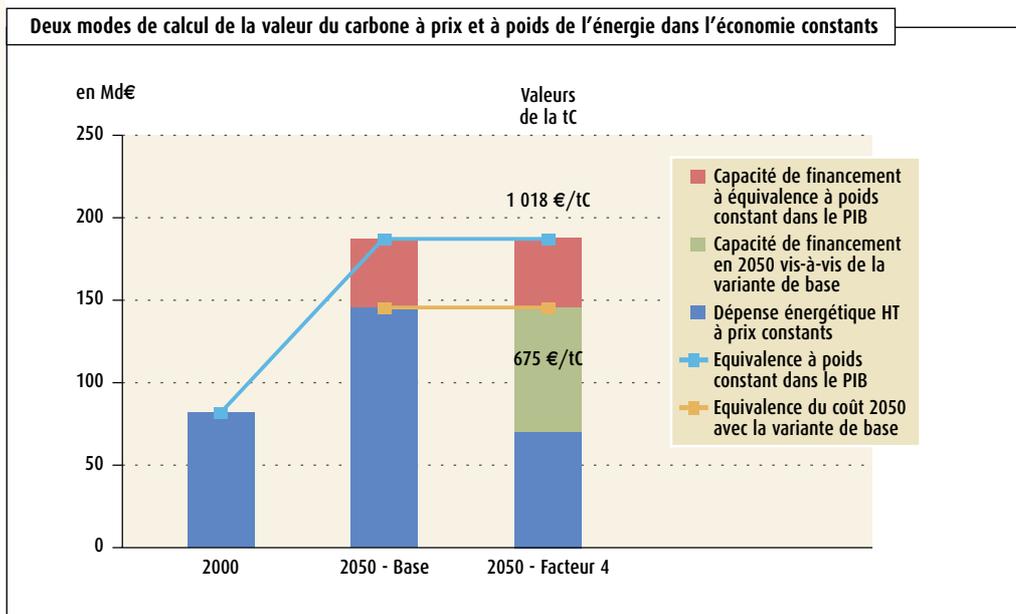
On aboutit à une valeur acceptable de 1018 €/tC (277 €/tCO₂) !

14 - Cette valeur représente assez fidèlement l'intérêt collectif, puisqu'elle intègre les sorties de devises, l'amortissement des investissements de production d'énergie, y compris la marge des opérateurs. Elle ne prend par contre en compte ni les investissements d'économie d'énergie, ni ceux concernant les substitutions dans les usages finaux, ni les productions renouvelables non marchandes (bois, solaire thermique...). L'amortissement de ces investissements doit être couvert par les écarts de dépenses énergétiques d'une variante à l'autre.

15 - Bien évidemment en respectant les parts de marché de chaque énergie dans chaque variante. Les valeurs indiquées sont des dépenses annuelles en euros 2000 constants.

16 - Ces résultats sont peu différents de ceux des autres variantes de facteur 4. Consommant toutes beaucoup d'électricité et peu de pétrole, elles varient essentiellement sur le volume de gaz à importer. Toutes présentent une dépense énergétique en 2050 comprise entre 67 Md€ et 71 Md€ (à l'exception de celle qui, misant sur la séquestration, maintient une consommation pétrolière plus lourde, sa dépense énergétique passe ainsi à 80 Md€).

La figure suivante illustre ces deux cas.



► L'anticipation d'une hausse des prix des énergies

Il convient de se préparer à une hausse des prix des énergies, du pétrole mais aussi du gaz de plus en plus sollicité. L'électricité augmentera aussi pour couvrir l'investissement dans les énergies renouvelables, la production à très haut rendement à partir des combustibles fossiles et l'amélioration de la sécurité nucléaire. Un doublement des prix du pétrole et du gaz vers le niveau de 28 à 56 \$/bl est à anticiper ainsi qu'une hausse des prix de l'électricité, du charbon et des renouvelables de 20 % (en euros constants).

- Ces hypothèses conduiraient à une dépense énergétique dans la variante de base sans maîtrise de l'énergie de 239,4 Md€, soit un niveau nettement plus haut que dans le cas précédent de stabilité du poids de l'énergie dans le PIB (183,5 Md€) avec un surcoût de 55,9 Md€. Ne pas lutter contre l'effet de serre et s'exposer aux tensions énergétiques internationales à venir reviendrait à encourager une ponction de 55,9 Md€/an sur l'économie nationale.
- La variante de facteur 4 présente elle une dépense énergétique de 90,5 Md€, son avantage se réduit donc mais reste très en deçà du niveau de dépense énergétique en cas de stabilité de la dépense énergétique dans le PIB.

La conclusion est claire. En aucune façon une hausse des prix des importations ne peut accaparer la baisse de la dépense énergétique acquittée par les agents économiques. En outre, si les politiques de transports se dégagent largement du pétrole, ce qui est indispensable pour atteindre le facteur 4, alors l'économie française deviendra largement insensible aux hausses des prix du pétrole.

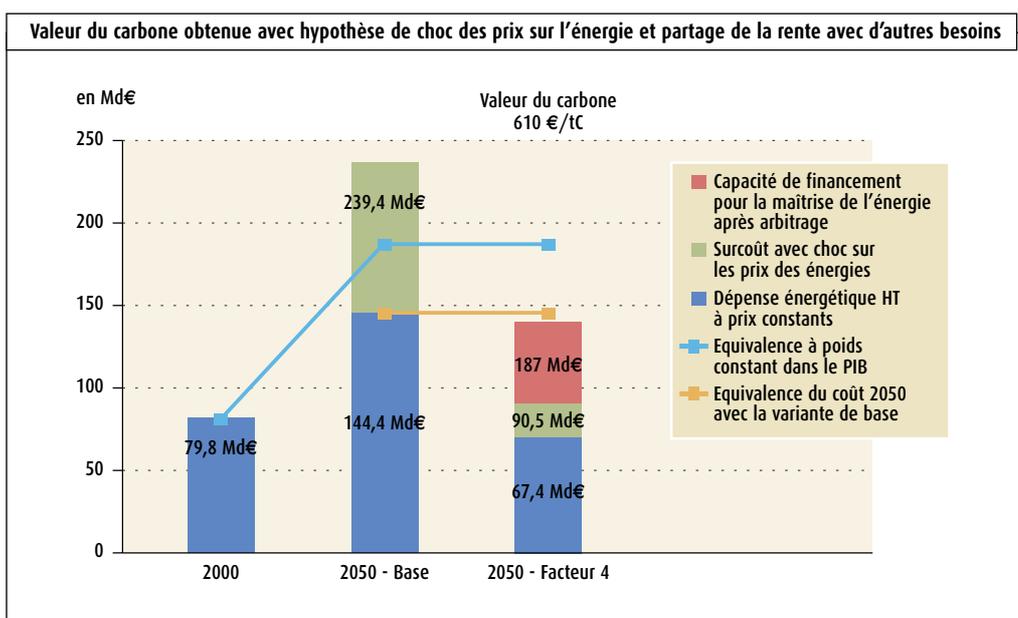
► Simulation du partage de la rente

Au terme de ces 3 analyses suivantes, à titre d'illustration, on peut faire la synthèse suivante :

- Si l'on prend en compte la hausse des prix des énergies à l'horizon 2050, la dépense énergétique à retenir dans la variante de facteur 4 est de 90,5Md€. L'écart entre cette dépense énergétique et celle du scénario de stabilité du poids de l'énergie dans le PIB qui en résulte est de 93 Md€ (entre 183,3 Md€ et 90,5Md€).
- Un partage de cette capacité financière peut être effectué par moitié : financer la lutte contre l'effet de serre d'un côté et prendre en charge d'autres demandes sociales en réduisant le poids de la dépense énergétique dans le PIB d'un autre côté. La valeur de la dépense énergétique ainsi obtenue est de 137 Md€.
- La valeur du carbone peut être calculée de deux façons :
 - L'augmentation du prix des énergies survenue, les 46,5 Md€ disponibles pour éviter l'émission de 114 MtC donnent une valeur du carbone de 408 €/tC (111 €/tCO₂).

– Si l'augmentation n'est pas survenue, sans accroissement des sorties de devises, c'est un écart de 69,6 Md€ de capacité de financement possible, d'où une valeur du carbone de 610 €/tC (ou 166€/tCO₂ ou 515 €/tep ou 70 \$/bl). Il s'agit là de valeurs suffisamment élevées pour amortir les investissements de maîtrise de l'énergie, de substitution ou de séquestration du carbone.

	2000	2050 – Variante de base	2050 – Variante F4 RCogN	Valeur du carbone obtenue en €/tC
Consommation d'énergie finale en Mtep	157	260	146	
1 - Dépense énergétique à prix constants en Md€	79,8	144,4	67,4	
Capacité de financement alors libérée pour la maîtrise de l'énergie		-	77,0	675 €/tC
2 - Dépense énergétique à poids équivalent dans le PIB en 2000 et en 2050		183,5	67,4	
Capacité de financement libérée pour la maîtrise de l'énergie		-	116,1	1 018 €/tC
3 - Prise en compte d'un choc énergétique		239,4	90,5	
4 - Partage de la rente avec d'autres demandes sociales et en intégrant une hausse des prix des énergies		239,4	137,0	
Capacité de financement finale libérée		- 55,9	46,5	653 €/tC



► La rente d'efficacité énergétique finance largement la lutte contre l'effet de serre

Des trois raisonnements qui précèdent et de la proposition d'arbitrage, on peut dégager des enseignements robustes :

Il est nécessaire d'allouer l'essentiel de l'écart de dépense énergétique entre la variante de base sans maîtrise de l'énergie et les différentes variantes de facteur 4 au financement des investissements d'efficacité énergétique et de séquestration du carbone.

Si tel n'était pas le cas, il en résulterait une tension croissante sur les marchés des énergies importées avec une hémorragie financière par renchérissement des cours mondiaux des énergies au bénéfice des pays producteurs, mettant alors les pays importateurs devant un double surcoût, des sorties massives de devises en même temps que l'urgence d'investir dans l'efficacité énergétique. L'intérêt à engager les politiques d'efficacité avant la hausse du prix des énergies est évident. Plutôt que d'attendre d'offrir une rente découlant d'une demande d'énergie supérieure à l'offre en faveur des pays exportateurs d'énergie, il vaut mieux anticiper en investissant dans la maîtrise

de l'énergie. Les chocs pétroliers des années 70 ont montré que le temps minimal d'adaptation à un choc était de l'ordre de 10 ans, puisque c'est le délai de réalisation des investissements lourds. Malheureusement dans la période d'attente de leur réalisation, le pays a plongé dans une grave crise économique. Une forte amélioration de l'efficacité énergétique permettra même de retarder la hausse des prix des énergies¹⁷.

On remarquera également que plus les coûts des hydrocarbures grimperont, plus la filière charbon avec séquestration du carbone s'approchera de la compétitivité.

Au-delà de cette stabilisation de la dépense énergétique vis-à-vis de la variante sans maîtrise de l'énergie, la marge qui existe par rapport à un poids inchangé dans le PIB par rapport à l'année 2000 n'aura pas à être mobilisée pour assurer la mutation de civilisation qui nous libèrera de l'aggravation de l'effet de serre. Ainsi en valeur relative, le poids du système énergétique va continuer de décliner, avec seulement le bémol suivant : ce sera probablement à un rythme plus faible que dans les dernières décennies. Lutter contre l'effet de serre ne sera pas une charge pour l'économie mais une voie de renforcement de l'indépendance nationale, un chemin en outre créateur d'emplois.

► Les conditions techniques de la performance économique

Une analyse détaillée reste à effectuer en fonction des options technologiques d'ici 2050. Mais contrairement à l'idée répandue, ces surcoûts restent faibles et sont de second ordre par rapport au rythme d'amélioration de l'efficacité énergétique et des hausses possibles des énergies. L'expérience acquise depuis 30 ans montre qu'une meilleure conception des équipements permet d'absorber l'essentiel des surcoûts (électroménager, équipements industriels, équipements thermiques). Ils sont également faibles dans le bâtiment (vitrages peu émissifs, isolants minces, traitement des ponts thermiques), dans les transports pour ce qui concerne les véhicules (dès lors que l'on en réduit le poids, la puissance et la vitesse de pointe). Les investissements additionnels les plus importants concernent les infrastructures (transports collectifs, réseau ferroviaire) mais leur très longue durée de vie en lisse le coût. Même raisonnement côté offre d'énergie, les seules dépenses réellement additionnelles concernent la séquestration du carbone et l'éventuelle mise en place d'une filière hydrogène. Les technologies qui perceront d'ici 2050 parmi les nombreuses options évoquées, seront celles qui réduiront le surcoût pour l'économie.

D'ailleurs quand les économistes parlent d'une forte valeur à accorder à la tonne de carbone, ce n'est pas un coût qu'ils décrivent mais le niveau d'une valeur destinée à réorienter les choix, à infléchir les comportements et finalement à dégager un avantage financier à choisir des technologies à contenu en carbone minimal. Cette valeur attribuée au carbone (qui s'apparente directement ou indirectement à de la fiscalité), introduite dans les prix puis captée par l'Etat et remise dans le marché donne ensuite les moyens de réaliser les investissements de la mutation ; en bref elle fait tourner l'économie.

Quelques règles peuvent guider les choix technologiques sans risque d'être démenti :

- Tout d'abord, il convient de réduire les pertes d'énergie et d'accroître les rendements dans un monde où le prix des ressources énergétiques ira croissant. Ce fut l'enseignement des chocs pétroliers des années 70, c'est la voie de l'indépendance énergétique et ce sera encore plus un facteur déterminant à l'avenir. Il en découle la nécessité de valoriser la chaleur rendue disponible par la production d'électricité à partir de combustibles fossiles. Sur une longue période historique, le métier de l'ingénieur et celui de l'économiste converge : la courbe de baisse des coûts suit celle de l'amélioration des rendements.
- Ensuite, il faut s'interdire de détruire du capital, c'est-à-dire d'engager des investissements énergétiques pour remplacer des ouvrages non arrivés en fin de vie voire pire non amortis, parce que confronté à l'urgence. Il faut donc essayer le plus possible de concentrer les investissements lors de la phase normale de renouvellement des équipements et faire preuve d'anticipation lors des décisions de construction d'infrastructures. La conséquence en est claire ; plus les décisions seront étalées dans le temps, plus les surcoûts seront réduits¹⁸. Cette nécessité de suivre le rythme ordinaire de rotation des investissements plaide également pour un déploiement rapide de l'effort de recherche. Les technologies généralisées en 2050 correspondent à des produits techniques mis en vente au plus tard en 2030 à des prix compétitifs et devront donc sortir des laboratoires le plus souvent dans la décennie qui vient et faire l'objet de prototypes avec 2020. Cela concerne les véhicules du futur, les énergies renouvelables et plus encore la séquestration du carbone.

17 - Cet aspect deviendra de plus en plus important autour de 2050 quand les gisements pétroliers les moins chers en viendront à se tarir.

18 - Ce constat issu de l'expérience se situe à l'opposé du raisonnement de certains économistes qui proposent de repousser les investissements au plus tard possible pour bénéficier de l'effet de l'actualisation des coûts.

- Enfin, la performance économique dépend de la durée d'utilisation des équipements. La portée de cette 3^e règle de performance est plus difficile à percevoir que les précédentes. Elle peut se traduire par une priorité donnée à des infrastructures collectives plutôt qu'à des solutions individuelles pour réduire les coûts (transport collectif versus véhicule personnel). Elle va peser dans les choix technologiques et économiques concernant l'optimisation de l'association de modes de production électrique intermittents (notamment renouvelables) avec des investissements de production, dont l'économie implique une durée très longue de fonctionnement et des modes moins capitalistiques mieux capables d'assurer les soldes. Elle arbitrera entre la mise en place d'un réseau de distribution d'hydrogène en fonction des performances et des coûts de stockage de l'électricité.

L'argumentation qui consiste à voir dans la lutte contre l'effet de serre une ponction sur l'économie qui va dégrader la croissance économique et engendrer appauvrissement et chômage ne tient pas. En fait, le coût dépend de la trajectoire (adaptation régulière ou mutation heurtée et conflictuelle) et du sentier technologique choisi (amélioration de l'efficacité énergétique ou développement de filières et de vecteurs énergétiques supplémentaires essentiellement au plan de l'offre d'énergie). La recherche de la performance économique indique les mêmes interdits et les mêmes incontournables qu'indiqué plus haut.



Les politiques publiques de lutte contre l'effet de serre

Il a été établi plus haut que l'amélioration de l'efficacité énergétique financera la lutte contre l'effet de serre et permettra une poursuite de la baisse du poids de la dépense énergétique dans le PIB ; il n'en reste pas moins que les bas cours des énergies importées depuis près de 20 ans donnent un signal myope par rapport à la tendance de moyen terme, et s'avère totalement démobilisateur.

Les points correspondent à un ordre de priorité. Chaque niveau n'a pas pour but de tout faire, mais d'engager ce que le niveau précédent ne peut pas faire.

- 1 - La première mesure à prendre doit être d'éclairer le marché d'abord par l'adoption d'une valeur de dérive des prix des énergies à venir et ensuite par une valeur du carbone à intégrer dans l'élaboration des choix d'investissement, qu'ils soient publics ou privés. Cette homogénéité de méthode n'est possible qu'adossée à un immense effort de formation initiale, continue et d'accompagnement du citoyen tout au long de sa vie.
- 2 - Les mécanismes de flexibilité (directive européenne sur les quotas échangeables, mécanismes de projets) doivent faciliter l'engagement le plus rapidement possible des projets ayant les coûts de réduction des émissions de carbone les moins élevés.
- 3 - En outre, la fiscalité doit éclairer le marché en intégrant directement une valeur du carbone dans les prix qui orientent les choix des consommateurs, notamment les ménages et les petites entreprises et évitent de reporter sur des dépenses à prendre en charge par la collectivité les conséquences de choix non raisonnables¹⁹.
- 4 - La réglementation doit ensuite éviter les comportements et les choix préjudiciables que la bonne information des acteurs et la qualité des prix n'auront pas suffi à orienter. En évinçant du marché, les matériels de mauvaise qualité, une norme réduit les prix des meilleurs matériels auxquels elle assure un large marché. L'autre champ privilégié de cette approche est l'amélioration progressive des réglementations thermiques dans la construction neuve.
- 5 - Il faut ensuite recrédibiliser la dépense publique. Sans l'Europe, l'Etat et les collectivités territoriales, pas de transports collectifs, de recherche, de formation, de qualité de construction, et l'on a vu plus haut l'importance de décisions rapides concernant les infrastructures.

Toute la panoplie est indispensable et doit être engagée simultanément. Il est regrettable qu'en France l'opposition marquée entre les tenants du marché libéralisé et ceux de l'intervention publique se traduit pour le moment par une neutralisation qui contraste par exemple avec le dispositif britannique qui couvre toute la gamme.

19 - L'idée de taxer à l'achat les voitures gourmandes en pétrole et de symétriquement donner une prime à toute acquéreur de voiture économe constitue un bon exemple de la démarche indispensable. La fiscalité doit avoir plus pour objectif d'orienter les choix que de remplir les caisses de l'Etat.



Et pour l'Europe et le Monde ?

Les pays européens sont tous confrontés à un même enjeu, à un même destin. L'Europe se présente unie à la table de négociation sur le climat, pourtant il n'y a pas de compétence européenne en matière d'énergie au sens des traités passés et semble-t-il futurs. Une politique énergétique européenne est pourtant indispensable.

Les pays doivent converger pour ce qui concerne les « interdits » et les « incontournables » et travailler ensemble sur les ruptures technologiques. Pour ce qui concerne les espaces de choix, à savoir la répartition entre énergies non carbonées nucléaires ou renouvelables chacun doit être libre de sa voie. Mais il faut que les divergences quant à l'usage du nucléaire cessent de bloquer les avancées indispensables en direction de l'efficacité énergétique, du développement des renouvelables et de trois domaines communautaires clés : la coordination de l'effort de recherche-développement, la mise en place d'infrastructures de transport ferroviaire à l'échelle du continent et l'harmonisation des instruments économiques notamment fiscaux.

A l'échelle mondiale, le point clé reste le fait que les équipements élaborés et diffusés au nord déterminent le développement au sud. Les pays du sud pourront assurer leur développement sans causer une envolée des émissions de dioxyde de carbone à la condition que les pays du nord fassent rapidement des progrès d'efficacité énergétique et facilitent les transferts de technologies. Avec comme enjeux clés pour les coopérations à développer : la qualité de la construction neuve, l'efficacité des appareils grand public, le développement des renouvelables, notamment pour la production électrique décentralisée, et de plus en plus la qualité des infrastructures de transport et des véhicules. On est bien tous dans le même bateau.

Parmi les variantes déclinées, deux posent difficulté quant à leur généralisation au monde : celle où le nucléaire a une place prépondérante et celle qui suppose la mise en place d'un réseau de distribution de l'hydrogène. Il convient de rappeler que l'ordre de classement des énergies dans l'approvisionnement énergétique mondiale (en un, le pétrole, en deux le charbon, en trois l'électricité et en quatre le gaz) correspond exactement à leur classement quant à leur difficulté logistique et quant à leur lourdeur capitalistique. Il ne faut pas oublier que les pays émergents dont les émissions sont le plus en hausse ont des taux de croissance et de consommation d'énergie compris entre 5 et 10 % par an. Dans un tel contexte les décisions penchent inévitablement en faveur des solutions les moins gourmandes en capital. En conséquence, deux types de variantes peuvent plus facilement connaître une diffusion mondiale : celles quiaturent prioritairement les potentiels d'efficacité énergétique puis le recours à la cogénération et aux énergies renouvelables et utilisent le nucléaire comme composante finale de bouclage, et surtout celles qui intègrent la séquestration du carbone. Les pays qui comme la Chine et l'Inde valorisent prioritairement leurs ressources charbonnières auront leur profil d'émission totalement dépendant de leur capacité ou non à séquestrer le carbone.

Conclusion : place au débat

L'approvisionnement énergétique des pays industrialisés a été le fruit des efforts des grandes entreprises du secteur et de l'Etat. Jusqu'aux chocs pétroliers, le consommateur avait un rôle mineur. Grâce à son implication, la réussite a été au rendez-vous. Mais la lutte contre le changement climatique pose un défi encore plus grand. L'efficacité de l'ensemble nécessite l'engagement de chacun. La maîtrise de l'effet de serre ne résultera pas de l'arrivée d'une technologie miracle mais impliquera une avancée générale de toute la société. La vitalité démocratique, la qualité des décisions de myriades de groupes humains des sphères publique et privée ainsi que la qualité des comportements pourraient bien devenir les facteurs déterminants pour maîtriser l'effet de serre. Une parole collective est à construire. Chacun doit pouvoir orienter sa vie par une claire appréciation des conséquences de ses choix individuels quotidiens.

Symboles, unités et coefficients multiplicateurs

CO ₂	dioxyde de carbone ou gaz carbonique
ppm (ou ppmv)	partie par million (en volume)
k (kilo)	pour les milliers (10 ³)
M (méga)	pour les millions (10 ⁶)
G (giga)	pour les milliards (10 ⁹)
T (téra)	pour mille milliards (10 ¹²)
teC	tonne équivalent carbone (1 teC = 3,67 tonnes de CO ₂)
tep	tonne équivalent pétrole (1 tep = 42 gigajoules = 11,7 mégawatt.heures)

Rapport rédigé par Pierre Radanne
Traduction anglaise : Mark Tuddenham

Conception et réalisation :  01 45 23 09 79

Copyright© 2004 Mission Interministérielle de l'Effet de Serre

35, rue Saint Dominique 75700 PARIS

« Tous droits réservés. Il est interdit de reproduire intégralement ou partiellement sur quelque support que ce soit le présent ouvrage (art L122-4 et L122-5 du Code la propriété intellectuelle) sans l'autorisation de la Mission Interministérielle de l'Effet de Serre »

Imprimé par IMP Graphic - Cosne sur Loire

Achévé d'imprimer le 14 juin 2004

Dépôt légal à parution

La relève du défi climatique, à savoir la réduction par 4 à 5 des émissions de gaz à effet de serre des pays industrialisés en 2050, passe par la construction d'une vision commune de l'avenir. C'est le but de cette étude. A travers une simulation à 2050 des consommations d'énergie et des émissions de gaz carbonique par secteurs et usages quotidiens, selon près d'une vingtaine de variantes, elle présente les conditions techniques d'une telle division par 4, les actions incontournables, les évolutions prohibées et les marges de manœuvre à partir d'aujourd'hui. L'objectif de cette première analyse est de fournir une introduction détaillée au débat nécessaire à la construction d'une action collective contre le changement climatique, grâce à l'identification de plusieurs scénarios pertinents possibles.



35, rue Saint Dominique - 75700 Paris
tél. 01 42 75 87 16 - fax 01 47 53 76 34
<http://www.effet-de-serre.gouv.fr>