

La division par 4 des émissions de gaz carbonique en France

Introduction au débat

La stabilisation du climat et le respect des obligations du protocole de Kyoto l'exigent : la France devra diviser par 4 ses émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2050. Comment y parvenir ? Etat des lieux et simulations, secteur par secteur, avant d'identifier les voies possibles, les sens interdits et les propositions techniquement envisageables. Et de rappeler, au-delà, le rôle – déterminant – des citoyens.

Pierre Radanne
*Mission interministérielle
de l'effet de serre*

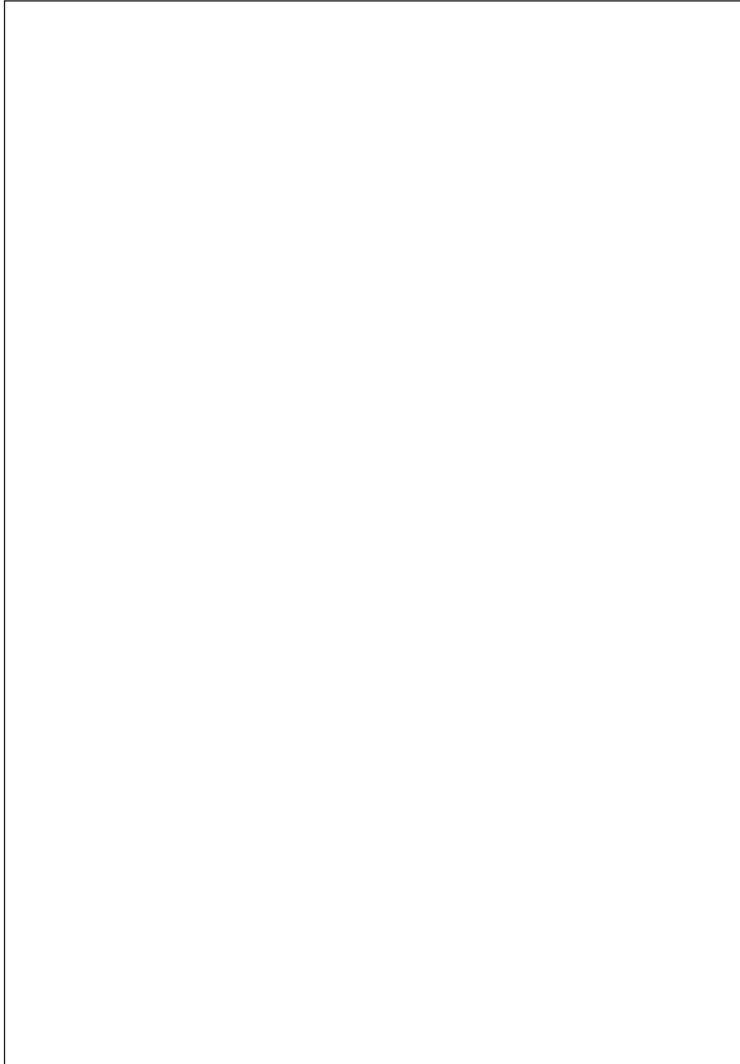
La question de l'effet de serre vient rebrasser les cartes de la donne énergétique, ce qui provoque des attitudes contrastées, comme toujours dans l'histoire, lorsqu'une question nouvelle émerge. D'abord de minimisation, pour défendre des stratégies et des intérêts menacés, ensuite de promotion de filières peu ou pas émettrices de CO₂ afin de conquérir des parts de marché et, enfin, de justification du lancement de technologies présumées salvatrices. Comme le secteur de l'énergie est traversé par des

divergences quant à la vision de l'intérêt collectif, aux choix économiques et aux conditions de la paix mondiale, nous devons éviter de faire de l'effet de serre un enjeu supplémentaire de conflit. Ce qui importe, c'est d'organiser le débat démocratique et de construire une réelle capacité collective d'action.

L'objet de ce texte n'est pas d'exprimer une quelconque préférence, mais de décrire sans exclusive les stratégies possibles et, à partir d'un exercice de quantification des émissions à l'horizon 2050, d'identifier les voies possibles, celles sans issue puis de hiérarchiser les propositions techniques.

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 industrialisés. La limitation planétaire globale du niveau d'émissions placera les pays en rivalité quant à leur possibilité d'émettre ces gaz perturbateurs du climat. Un jour ou l'autre, il faudra décider d'une convergence des émissions par habitant entre pays, soit une



Le secteur de la construction pourrait être amené à connaître une double révolution, celle de la qualité et celle de sa contribution à la production d'électricité par cogénération et par solaire photovoltaïque. On parle alors de « bâtiment à énergie positive ».

sorte de suffrage vraiment universel avec un plafond annuel d'environ une demi-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 gaz carbonique dans l'atmosphère. En fait, une réelle stabilisation du climat au niveau actuel ne serait garantie que par l'émission

de 3 Milliards de tonnes de carbone par an (1) (par rapport aux 5 MdtC qui résulteraient d'une émission de 0,5 tC/hab pour une population mondiale en 2050 de 10 Mds d'habitants).

Le Président de la République comme le Premier ministre ont donc fixé le cap pour la France, au nom de cette vision de long terme, avec une division d'un

facteur 4 de nos émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 (2). Le niveau français d'émissions de gaz carbonique lié aux consommations énergétiques étant de 1,8 tC/hab en 2000, atteindre ce niveau de 0,5 tC/hab constitue précisément une division par 3,6. Un niveau d'émission de 0,5 tC/hab, transposé en 2050 à une population française de 64 millions d'habitants, donne 32 MtC.

Or, bien évidemment, d'ici 2050, la croissance économique va générer des émissions supplémentaires. Une projection tendancielle des émissions de gaz carbonique à partir d'une croissance économique moyenne de 1,7 %/an (3) conduirait à une émission de CO₂ de 140 MtC en 2050 avant tout nouvel effort de maîtrise ou de substitution d'énergie. C'est donc une division par 4,4 qu'il faudra finalement réussir.

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 MtC 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. La décomposition par énergie finale est aussi intéressante : 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 près de deux tiers des émissions. Les émissions imputables à l'électricité sont, par contre, très faibles puisque seulement un dixième de celle-ci est produit 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 par la croissance des nouveaux plants).

L'enjeu d'une division par 4 des émissions

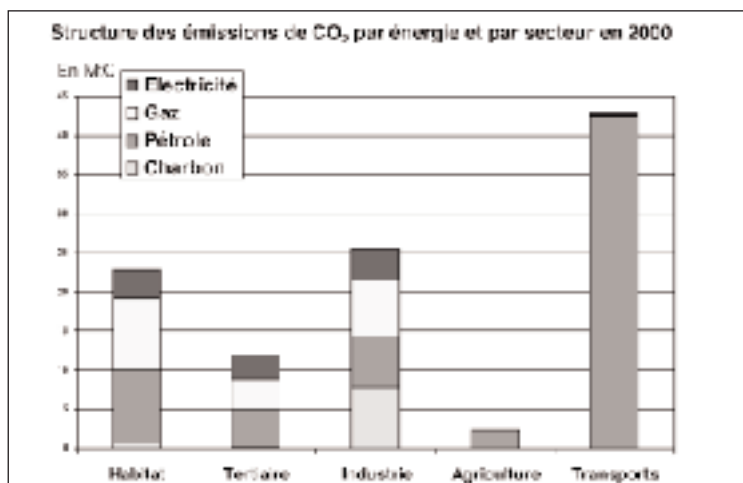
On peut comparer cette situation 2000 à une évolution tendancielle (avant tout effort de maîtrise de l'énergie ou de substitution) et à l'objectif de 32 MtC pour 2050. Les usages thermiques des secteurs résidentiel et tertiaire émettent déjà à eux seuls autant que ce qui sera possible en 2050 pour tous les secteurs écono-

miques confondus. Les transports, eux, émettent déjà aujourd'hui 1,3 fois plus que ce qui sera possible pour le pays en 2050 ; or ces émissions continuent de croître à près de 2 % par an en absorbant les progrès réalisés dans les autres secteurs. Le secteur électrique ne peut, quant à lui, plus guère progresser par rapport à son niveau actuel.

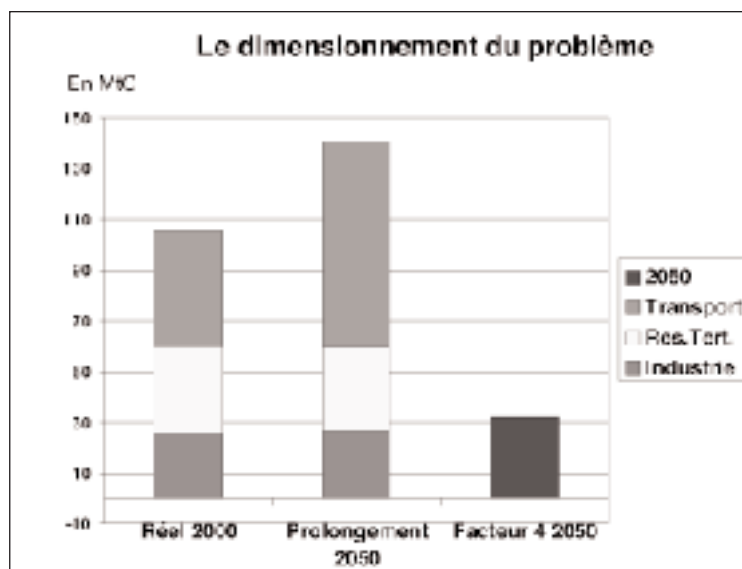
Le graphique 2 permet de visualiser cet enjeu.

La présentation de l'exercice de simulation à 2050

Ce texte présente les conditions d'une telle division par 4. Il s'appuie sur un premier exer-



Graphique 1

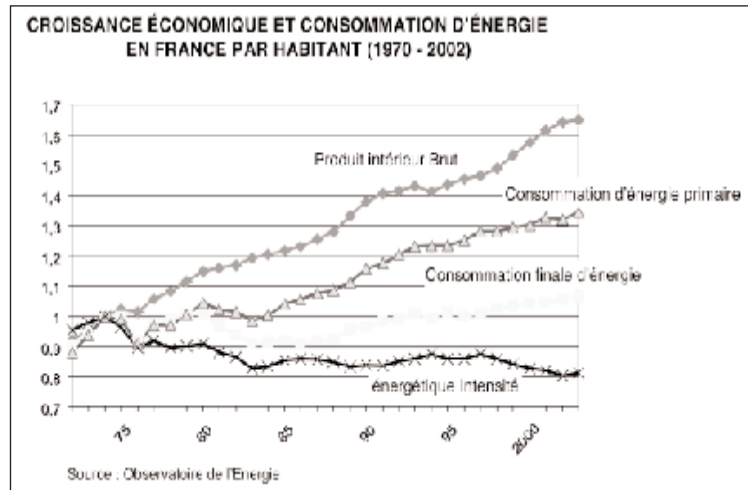


Graphique 2

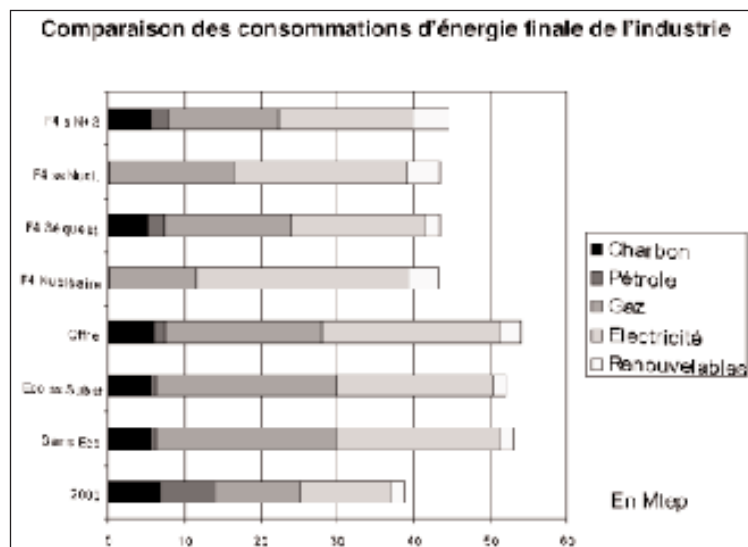
cice de projection à l'horizon 2050 des consommations d'énergie et des émissions de gaz carbonique. Malheureusement, dans le format de cet article, il n'est pas possible d'en détailler les simulations ni d'en présenter la méthodologie. Les seuls éléments quantitatifs ici introduits constituent des ordres de grandeur dont la robustesse a été vérifiée.

La sensibilité à la croissance économique et sa répartition

Le taux de croissance retenu, de 1,7 %, conduit à une multiplication par 2,3 du PIB en 2050. Il en découlera une consommation énergétique, liée à des besoins sociaux nouveaux, en croissance de 72 % (4). Cette moindre augmentation s'explique à la fois par la saturation de certains usages thermiques conjuguée à de l'apparition de nouveaux usages aux consommations énergétiques, surtout électriques, moins intensives en énergie. 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 l'évolution de la mobilité des personnes et des biens.



Graphique 3



Graphique 4

Pour apprécier cette croissance de la consommation d'énergie, il est utile de rappeler l'évolution depuis 30 ans. Le graphique 3 fait apparaître une croissance économique par habitant de 65 % entre 1973 et 2002, pour une augmentation de 33 % de la consommation en énergie primaire et de 8 % seulement en énergie finale. Ainsi une croissance du PIB de 2 points n'a impliqué une aug-

mentation que d'un point de la consommation d'énergie primaire. La croissance encore plus faible de la consommation d'énergie finale qui, elle, décrit le mieux la satisfaction des besoins sociaux, s'explique par le rendement moindre des réacteurs nucléaires par rapport aux anciennes centrales thermiques. Cette quasi stabilisation de la consommation d'énergie finale

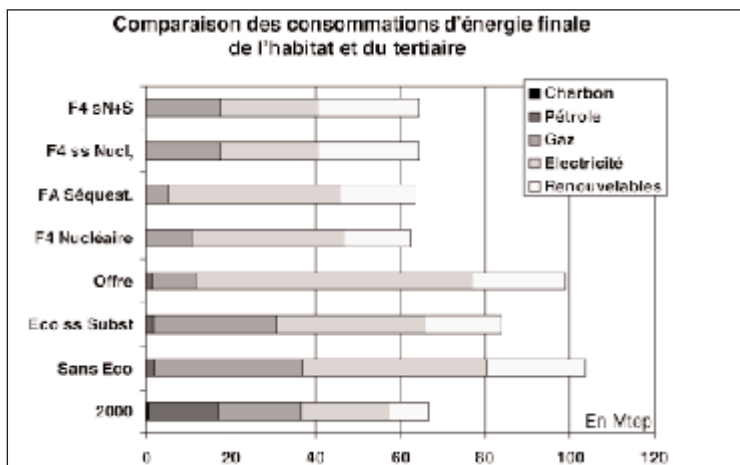
par habitant résulte des progrès importants réalisés, surtout jusqu'en 1986, dans la maîtrise de l'énergie et des puissants mouvements de substitution vers des techniques efficaces faisant appel principalement à l'électricité et au gaz. Cette dernière composante ne jouera plus avec la même puissance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

Les évolutions par secteur

Les variantes étudiées

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 répartitions différentes des parts de marché entre énergies, tandis qu'une dernière catégorie de variantes a pour finalité une division par 4 des émissions de carbone. Dans cette note de synthèse, on mentionnera seulement 7 variantes :

- une variante sans progrès d'économie d'énergie (notée « sans Eco » dans les graphiques) au-delà des performances moyennes des équipe-



Graphique 5

- et sans inflexion nouvelle des tendances de substitution (au-delà de la tendance au remplacement du charbon et du pétrole sous chaudière par le gaz, à la pénétration de l'électricité dans les procédés et les usages thermiques dans l'habitat, et au maintien de la position hégémonique du pétrole dans les transports) ;
- une variante avec effort accentué d'économie d'énergie (notée « Eco ») mais sans modification des parts de marché entre énergies par rapport à la variante précédente ;
- une variante de seule réponse à la contrainte climatique par l'offre (notée « offre »), c'est-à-dire par des substitutions en faveur de l'électricité d'origine nucléaire mais, à l'inverse, sans effort de maîtrise de l'énergie.

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

Les 4 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 accentué du nucléaire (notée « F4 nucléaire ») et de la pénétration de l'électricité dans tous les usages, y compris les transports ;
- une variante de sortie du nucléaire (notée « F4 ss Nucl. ») notamment par un développement accru des renouvelables et de la cogénération ;
- une variante 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 gaz carbonique (notée « F4 sN+S »).

Ces 7 variantes assurent toutes 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 jamais 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 « espaces de choix » quand différentes stratégies conduisent à des résultats équivalents
- et les « ruptures », c'est-à-dire les sauts technologiques majeurs qui pourraient venir élargir les marges de manœuvre.

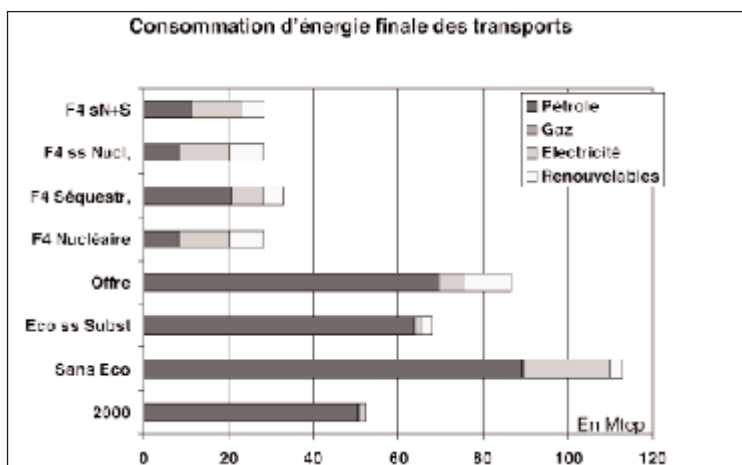
L'industrie

L'activité industrielle devrait progresser à un rythme de l'ordre de 1,2 % par an (5). L'augmentation de 80 % de l'activité industrielle ainsi obtenue

en 2050 devrait conduire à une augmentation de 40 % de la consommation d'énergie, avant tout progrès nouveau d'efficacité énergétique.

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

Pour le reste, le niveau de consommation d'énergie de l'industrie dépendra des progrès en matière d'efficacité énergétique. C'est là une nécessité incontournable. Elle peut prendre trois formes : 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 (éva-poration, séchage, séparation) ainsi que 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



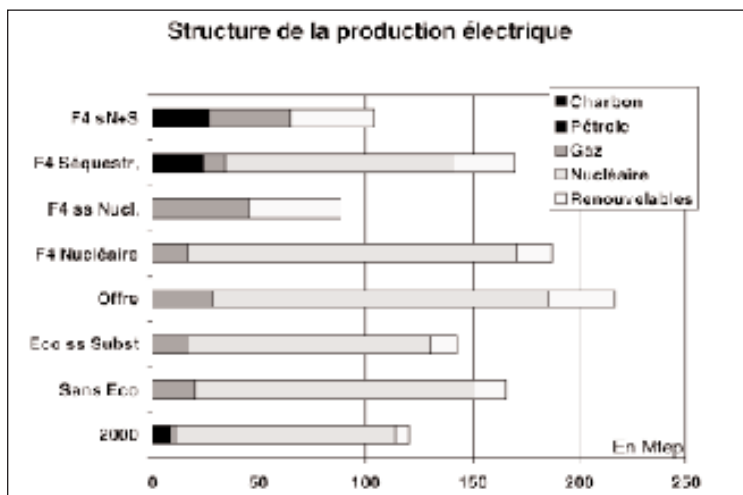
Graphique 6

énergétique conduisent à une économie du quart de la consommation d'ici 2050, soit du même ordre que celle réalisée dans les 30 dernières années.

Les variantes qui visent une division par 4 des émissions, varient essentiellement par le niveau de pénétration de l'électricité en substitution des combustibles fossiles. Les potentiels de gains en efficacité permettent de retrouver une consommation 2050 en hausse de seulement 10 % par rapport à celle de 2000.

Le résidentiel-tertiaire

La « décohobitation » des ménages et l'accroissement des surfaces des logements neufs par rapport à l'ancien 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 plus vif que celui de l'habitat, il est proche de 2 %. 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 facteur 4 ne peut être tenu sans un effort massif d'isolation et d'amélioration des équipements thermiques des bâtiments.



Graphique 7

Depuis 30 ans, des progrès considérables ont été effectués dans la construction neuve (consommation d'énergie moyenne d'un logement neuf réduite de 60 % à confort équivalent). 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 m² chauffé. Il conviendra également de prendre en compte la demande croissante de confort en période estivale, en évitant une explosion des consommations d'électricité par multipli-

cation des climatiseurs dans des logements mal isolés et sans protection contre le rayonnement solaire direct. 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 pour 2050 pourrait passer de 70 à 44 Mtep (elle était de 52 Mtep en 2000).

Le niveau des émissions liées aux besoins de chauffage va, lui, 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 chauffages, dans la quasi totalité du parc neuf, utilisant le gaz ou l'électricité. Plusieurs répartitions du marché peuvent ensuite être envisagées pour réduire les émissions de gaz carbonique. Voyons en 3.

- *Un passage massif au chauffage électrique.* Mais, comme les consommations de chauffage sont concentrées sur une partie de l'année, elles génèrent des pointes de consommation d'électricité. Actuellement, elles sont surtout assurées par la production hydraulique et par les 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 pointe (6), une part croissante de cette électricité devra être produite à partir de ... combustibles fossiles.

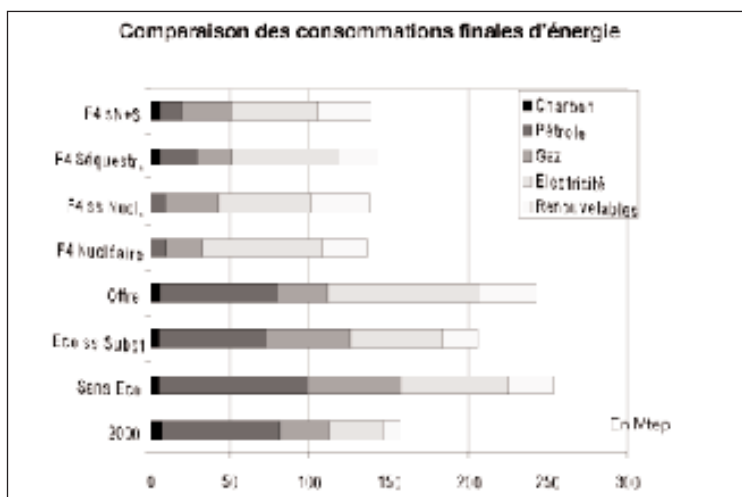
- *Un développement des énergies renouvelables thermiques* (bois, géothermie, solaire thermique, valorisation de la chaleur issue de l'incinération des déchets). Avec les techniques existantes, leur production peut aisément passer de 10 à 20 Mtep et couvrir près de la moitié des besoins thermiques. Il s'agit là probablement d'une limite, compte tenu des normes urbaines.

- *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.

Le résidentiel et le tertiaire consomment, en outre, de plus en plus d'électricité (éclairage, cuisson, électroménager, électronique de loisirs, équipements professionnels [bureau-

tique, reproduction, télécommunications, Internet]). 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. 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. 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



Graphique 8

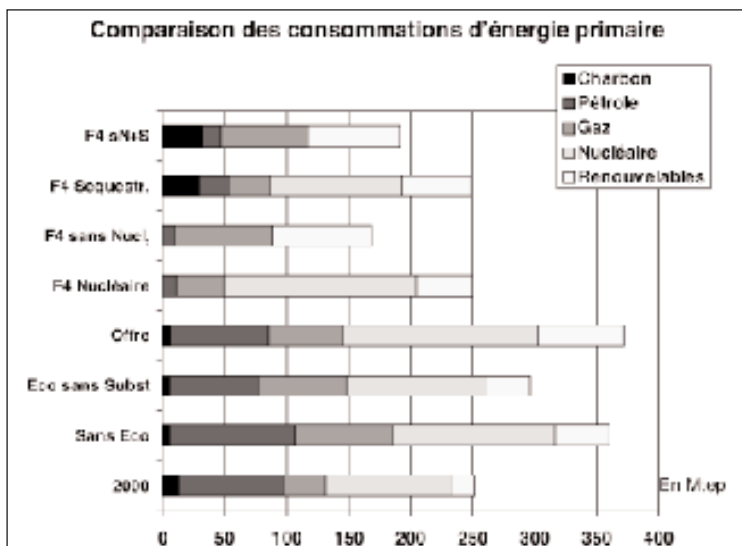
centrales au charbon, et donc permettront d'importantes réductions d'émissions communautaires.

Une projection à 2050 sans effort d'efficacité énergétique conduit à une multiplication par 2,3 des consommations d'électricité spécifique. L'amélioration de l'efficacité énergétique pourrait 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 pourrait 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 ».

On assisterait donc à une stabilisation de la consommation d'énergie dans le résidentiel-tertiaire, les gains dans le chauffage étant contrebalancés 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



Graphique 9

consommations d'énergie. Dès lors, le niveau d'émission dépendra de la répartition entre les combustibles fossiles, le nucléaire et les renouvelables.

Les transports

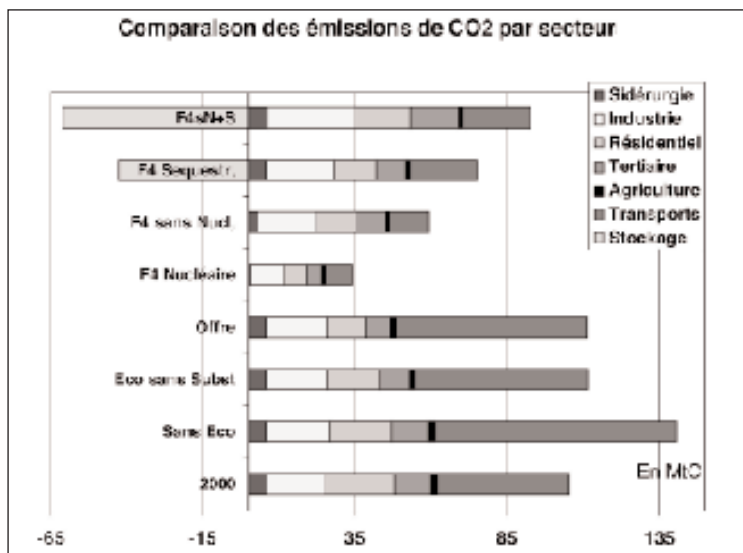
Le secteur transport combine plusieurs difficultés : croissance forte, totale dépendance à l'égard du pétrole et caractère diffus des consommations d'énergie et des émissions.

La première incertitude porte sur l'importance de la croissance de la mobilité. La projection a été fondée sur un rythme de 1,7 % par an, identique à celui de la croissance économique. Les facteurs qui génèrent en effet la croissance des trafics resteront puissants dans les décennies à venir pour le transport, et des personnes et 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 part du pétrole du fait du poids croissant de la route et du transport aérien. Or, premier interdit, dévastateur, le pétrole ne saurait conserver la place qui est la sienne dans un secteur des transports dominé, pour longtemps encore, par le véhicule individuel. Son niveau actuel dépasse déjà largement ce qui est possible en 2050 pour tous les secteurs confondus, alors que tous les experts s'accordent sur une croissance à venir encore forte des trafics. Tous les scénarios de facteur 4

impliquent un niveau d'émissions des transports proche de 10 MtC. Cela n'est possible qu'avec une part du pétrole dans les transports inférieure à un tiers 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 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 cli-



Graphique 10

matique. 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, etc.), est considérée comme non émettrice de gaz carbonique car celui libéré à la combustion est compensé par son absorption lors de la croissance des cultures. Les scénarios visant le facteur 4 prennent tous en compte la production, sur jusqu'à un quart de la surface agricole utile, de 8 à 14 Mtep de biocarburants se substituant à du pétrole;

- le développement de motorisations sans émission de CO2 par le véhicule. Deux grandes voies d'avenir existent. Il est déjà possible de développer la motorisation électrique à travers le véhicule hybride (sans perte d'autonomie, ce que permet l'utilisation en appoint d'un carburant liquide alimentant un moteur thermique classique). 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 avancée technologique dans le stockage de l'électricité dans les batteries 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 beaucoup d'énergie. Elle serait apportée par du nucléaire, des renouvelables ou des combustibles fossiles (avec, alors, obligation de séquestration du CO₂). Cette solution théoriquement séduisante implique d'importants progrès techniques, des infrastructures coûteuses de transport de l'hydrogène et un surcoût des véhicules. L'horizon de la généralisation au plan mondial d'un tel système de transport se situe, dès lors, au-delà de 2050 ;

- des transferts modaux, notamment vers le rail. Les alternatives à la route et au pétrole, ce sont le développement des transports collectifs, des modes doux dans les aires urbaines, le développement du train à grande vitesse pour concurrencer le transport aérien sur courte liaison et celui du transport combiné et du fret ferroviaire pour assurer les échanges internationaux de marchandises ;

- une maîtrise de la mobilité par des politiques d'aménagement du territoire et d'urbanisme. La répartition spatiale des activités (emplois, logements, services, commerces) a profité depuis un demi-siècle

d'un coût décroissant du transport ; il en a résulté un allongement des distances. Une optimisation d'ensemble du secteur transport va nécessiter une maîtrise de la mobilité contrainte, par une plus grande mixité des fonctions. 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). La substitution « de litres d'essence par des octets » réduira fortement les émissions.

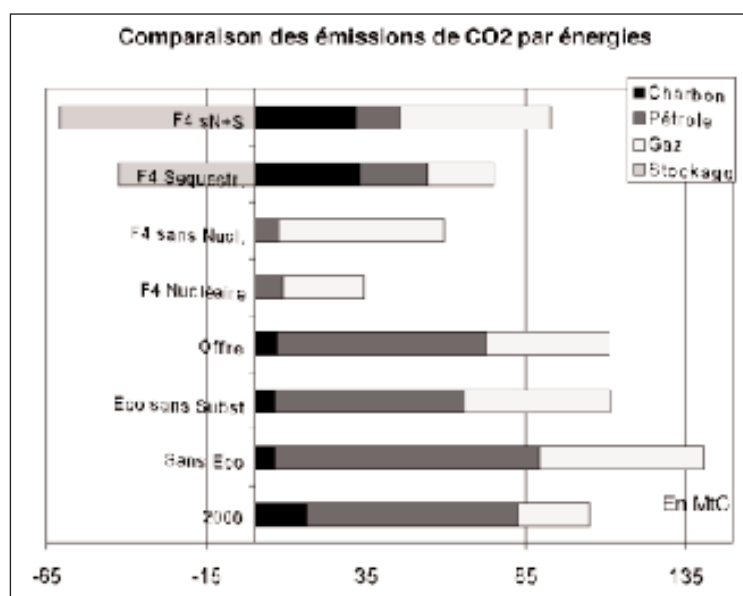
Les simulations effectuées montrent que c'est de la performance du secteur transport que va dépendre le plus la lutte contre l'effet de serre,

mais les marges de progrès sont importantes puisque, aujourd'hui, le rendement moyen des voitures ne dépasse guère 20 %.

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 réduction d'un quart, sans contrainte majeure sur la mobilité.

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'hy-



Graphique 11

draulique 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 les 15 années 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.

A l'horizon 2050, la totalité des moyens de production thermiques et nucléaires devront avoir 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 46 MtC (7). Aucun scénario de réduction forte des émissions ne peut, dans ces conditions, être fondé sur la production massive d'électricité à partir de 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 le gaz dans leur production électrique.

La seule solution évitant un tel interdit serait la séquestration du CO₂ qui permettrait de garder une production électrique significative à partir de combustibles fossiles, même du charbon.

Pour l'avenir, deux voies permettent une production d'électricité sans émission de gaz carbonique : le nucléaire et les énergies renouvelables. 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 acceptabilité sociale durable. 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, ni 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 trois catégories : celles dont la produc-

tion 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 ; celle qui 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, à l'horizon 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 photovoltaïque 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.

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.

Les profils de consommation d'énergie et d'émission ainsi obtenus

Les quatre variantes facteur 4 donnent des résultats équivalents, en volume global, d'énergie finale : autour de 146 Mtep, soit un niveau un peu moins élevé qu'en 2000 (158 Mtep).

L'évolution par rapport à 2000 est très importante. Pour satisfaire un niveau d'énergie utile d'alors évalué à 86 Mtep, il n'a fallu pas moins de 251 Mtep en énergie primaire, 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 250 Mtep en cas de recours massif au nucléaire (avec un

rendement de production qui reste inférieur à 40 %) et de 169 Mtep dans le cas d'utilisation massive de renouvelables et de la cogénération à la place du nucléaire. Rapportées au volume d'énergie utile, ces variantes présentent respectivement un rendement global de 55 et de 81 %.

Le graphique 9 donne les résultats des différentes simulations exprimés en énergie primaire.

Toutes les simulations prolongeant la tendance présentent une proportion d'énergies carbonées inférieure à 50 %. Avec la simulation facteur 4 nucléaire, elle chute à 20 % (57 % de nucléaire et 23 % de renouvelables). La simulation avec séquestration maintient une place plus importante aux combustibles fossiles, avec 37 %. Dans la variante sans nucléaire et sans séquestration, les renouvelables assurent 55 % de l'approvisionnement et les combustibles fossiles 45 %.

Dans le graphique 10, présentant les émissions de gaz carbonique par secteur, on mesure l'effet des différentes actions possibles dans les transports pour aboutir à une division par 4 des émissions.

Le scénario avec séquestration dispose de beaucoup plus de souplesse que les autres. Il atteint les objectifs finaux avec un niveau d'émissions 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 constitue le maximum possible : soit la totalité des émissions produites par les consommations de pétrole et de charbon dans l'industrie et la production électrique.

Les enseignements des différentes variantes

L'accroissement des émissions de gaz carbonique entraîné par la projection tendancielle 2050, sans prise compte d'économie d'énergie et de mouvements de substitutions, est plus intéressant à analyser dans sa répartition que par son niveau. Les émissions des industries, du résidentiel-tertiaire et de l'agriculture restent en effet stables ; l'accroissement est le fait des transports. Comme on l'a vu dans l'analyse par secteur, la hausse des émissions due à celle de l'activité économique et des besoins sociaux est compensée par un recul régulier – déjà perceptible – des énergies les plus carbonées dans les usages thermiques (8).

- 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, aboutissent à des résultats comparables : 111 MtC. Elles ne permettent que de stabiliser les émissions. On doit en conclure que le développement des économies d'énergie, comme celui des énergies non carbonées, constituent deux options

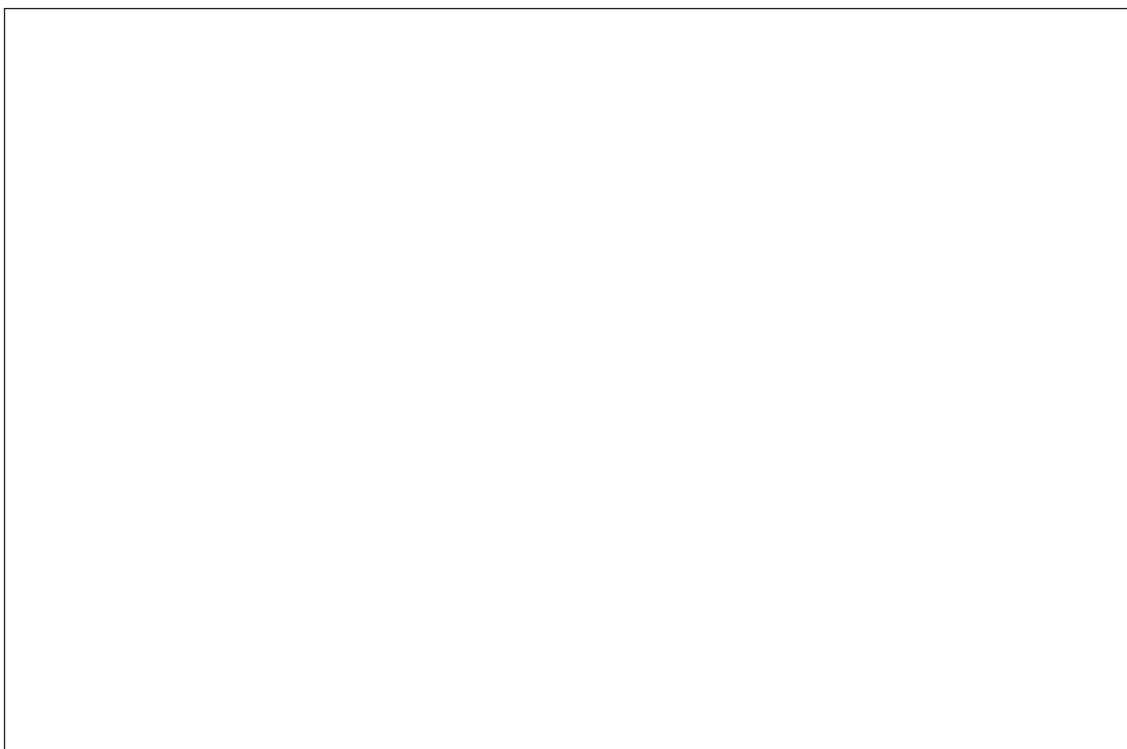
incontournables pour envisager de meilleures performances.

- Le scénario Facteur 4 avec nucléaire doit ses performances à un effort d'électrification des transports et de recours aux renouvelables pour contribuer aux besoins thermiques. Avec 34 MtC, il parvient à la division par 4. Malgré un effort généralisé d'économie d'énergie, il rend indispensable un accroissement de moitié du parc nucléaire actuel.

- Dans le scénario de sortie du nucléaire sans séquestration

du carbone, la contribution du nucléaire ne peut être assurée en totalité par les énergies renouvelables du fait de leurs limites et 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 une émission de 60 MtC.

- Le scénario avec séquestration du carbone et recours au nucléaire dispose d'une marge de manœuvre accrue : maintien de fortes contributions du charbon dans l'industrie



La part du pétrole dans les transports ne devra pas dépasser le tiers de l'énergie finale du secteur. Pour cela, il faudra, entre autres, développer les alternatives à la route et au pétrole, c'est-à-dire les transports collectifs, des modes doux dans les aires urbaines, le train à grande vitesse, le transport combiné et le fret ferroviaire.

lourde et, en contrepartie, 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 deux tiers par du pétrole et une part du nucléaire dans la production électrique qui se situe à 55 %.

- Le scénario de sortie du nucléaire qui bénéficie des possibilités de séquestration parvient aisément, lui aussi, à la division par 4 des émissions.

La hiérarchisation des choix

Les interdits

La présentation qui précède des évolutions nécessaires par secteur consommateur et dans la production électrique a mis en évidence des interdits : utilisation massive de combustibles fossiles pour la production d'énergie thermique, une production électrique à flamme, un secteur transport dépendant du pétrole. Mais parmi les interdits, le plus grave serait de différer la construction des infrastructures. Le résidentiel-tertiaire et les transports sont caractérisés par des inerties très fortes.

Les espérances de vie moyennes du parc bâti et des infrastructures de transport sont proches du siècle. Les politiques les concernant doivent être mises en place rapidement.

Les incontournables

Tous les scénarios, quelles que soient les répartitions entre énergies, sont très sensibles au niveau des consommations. L'effort de maîtrise de l'énergie doit être généralisé dans tous les secteurs. En outre, il serait vain d'espérer des changements de comportements si les performances des appareils restent médiocres et leur régulation et leur gestion de mauvaise qualité.

Cette obligation 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 au réseau de lourds défis d'équilibre et nécessiteront une part de production thermique pour assurer les ajustements avec la souplesse nécessaire.

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. Les acteurs y sont-ils prêts ?

Cette catégorie des incontournables inclut le développement des énergies renouvelables. Celles-ci permettent une diversification du système énergétique, assurent la relève des combustibles fossiles dans des usages thermiques et dans les transports et participent à la production électrique. Si leur contribution est souvent limitée et irrégulière, elle n'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 quatre percées scientifiques majeures étaient réalisées :

- 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'in-

formatique, 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 en dehors des heures d'utilisation ;

- *le stockage de l'électricité.* La question du stockage de l'électricité mobilise les scientifiques depuis 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. Mais les batteries performantes coûtent encore cher. Si des progrès sont réalisés dans le stockage massif de l'électricité, c'est l'intégration dans le réseau électrique de productions discontinues, notamment celles des renouvelables, qui sera 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. Une méthode qui a toutefois ses limites : la capture, l'opération la plus coûteuse, n'est envisageable que pour

des installations consommant plusieurs centaines de milliers de 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). 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 douloureux ;

- *le passage à une économie de l'hydrogène.* Passer d'une économie énergétique à base de carbone à une suivante à base d'hydrogène, le concept 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, la capacité à produire l'hydrogène sans générer d'émission de gaz à effet de serre et, aussi, la constitution d'un réseau de distribution.

L'avenir est ouvert. On pourra toutefois méditer sur la façon dont la nature a géré le problème. D'une atmosphère originelle composée de gaz carbonique et de méthane, le monde vivant a fait une atmosphère composée d'oxygène et d'azote, tout en assurant ses transferts d'énergie à partir du cycle du carbone *via* la photosynthèse et la respiration. La maîtrise du climat n'a pas découlé d'une décarbonisation mais de la gestion d'un cycle où les émissions sont équilibrées par les absorptions. En tous cas, l'analogie pousse à s'intéresser sérieusement à la séquestration du carbone.

Des espaces de choix réels

La question des espaces de choix renvoie à un débat difficile, celui de la place du nucléaire. Cet exercice oblige d'ailleurs à en relativiser l'importance. Cette source d'énergie contribue aujourd'hui en France à 17 % de la consommation finale d'énergie et occupe... près de 100 % du débat ! 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 une politique énergétique qui comprendrait toute cette palette, un scénario nucléaire restera fragile car fortement dépendant d'une seule source d'énergie, de la pérennité de sa maîtrise technologique et de sa difficulté à devenir un standard mondial, y compris pour les pays pauvres ou instables.

L'hypothèse d'une sortie du nucléaire doit aussi naviguer entre des contraintes fortes : niveau très élevé d'efficacité énergétique et de sobriété des comportements, développement réussi des énergies renouvelables sur les plans technologique et économique. Cette voie possible nécessite de réussir à réduire les coûts de la production électrique photovoltaïque. Faute de quoi, ce scénario dépendra 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. Le choix entre le nucléaire et les énergies renouvelables doit être laissé ouvert au débat politique, après analyse approfondie de leurs possibles contributions.

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. L'intensité énergétique, exprimée en énergie finale par rapport au PIB, a été réduite de près d'un tiers entre 1973 et 2000.

Mais la lutte contre le changement climatique pose un défi encore plus grand. L'efficacité de l'ensemble nécessite l'engagement de chacun. La vitalité démocratique et 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 réorienter sa vie grâce à une claire appréciation des conséquences de ses choix individuels quotidiens.

Notes

(1) Ce chiffre correspond à l'absorption naturelle du CO₂ par les puits (essentiellement l'océan). Dans la suite du texte on notera MtC pour millions de tonnes de carbone et MdtC pour milliards de tonnes de carbone.

(2) Le concept de Facteur 4 a été introduit par Ernst Ulrich von

Weizäcker et Amory 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 faible.

(4) 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.

(5) On n'a pas ici pris en compte les tendances de délocalisation des industries de base ; celles-ci se traduiraient par une réduction des émissions mais aussi par un quota d'émissions moindre pour la France, dans une optique d'équité dans la répartition mondiale des émissions par habitant.

(6) Les besoins de chauffage correspondent en moyenne à 2 500 heures par an, soit près de 30 % d'une année.

(7) Calculés sur la base de 64,5 Mtep d'électricité en 2050, soit le double d'aujourd'hui, et avec la répartition suivante : Turbines à gaz 45 %, cogénération gaz 25 % et renouvelables 30 %.

(8) En fait la part de ces secteurs ainsi que celle de la production d'énergie sont stables depuis 1990 : 66 MtC en 1990 et 66,8 MtC en 2001 tandis que les émissions des transports passaient de 32,5 MtC à 38,3 MtC hors routes aériennes et maritimes.