

Energie et changement climatique : diviser par trois en trente ans nos émissions de gaz carbonique

Lutter contre le réchauffement de l'atmosphère impose de diminuer les émissions de gaz carbonique. Or la France peut diminuer profondément ses émissions en infléchissant sérieusement ses modes de vie mais sans les bouleverser. La population l'acceptera d'autant mieux qu'elle prendra meilleure conscience des enjeux (*).

**par Henri Prévot,
Ingénieur général des mines**

Un scénario plausible pourrait être le suivant : forte augmentation de l'énergie de biomasse ; meilleure utilisation de la chaleur solaire ; croissance soutenue de la production d'électricité nucléaire (et peut-être au charbon avec séquestration du gaz carbonique) ; baisse de la consommation de carburants, non en diminuant la mobilité mais en tirant parti des possibilités techniques de la motorisation, notamment la bi-énergie carburant et électricité ; isolation thermique ; conception des bâtiments ; orientations d'urbanisme et choix des infrastructures tendant à diminuer les consommations d'énergie fossile des transports et du chauffage. Cela pourrait diviser par trois les émissions par habi-

tant en trente ans, les prix de l'énergie étant augmentés de 300 à 400 euros par tonne d'équivalent pétrole (TEP). Parallèlement, seraient menés des efforts intensifs de recherche sur la production d'électricité par fusion nucléaire et sur les énergies renouvelables continues. Cette politique mettrait notre pays en position très favorable dans le cas où les controverses ou les confrontations entre zones du monde prendraient pour argument les effets du changement climatique, montrerait le chemin vers une économie sobre en énergie et susciterait chez nous un appréciable regain d'activité.

Un effort inutile ?

Attribuer le réchauffement de l'atmosphère aux émissions par l'activité humaine de gaz à effet de serre fait l'objet d'un accord assez général. Pourtant à la lutte contre ces émissions, on oppose trois arguments.

La lutte contre l'effet de serre est présentée à tort comme un moyen de se préparer à la pénurie de sources d'énergie fossile. Un tel rapprochement est fallacieux puisque la pénurie d'énergie ne se fera pas sentir avant longtemps alors que, pour ce qui est du changement climatique, « il y a déjà le feu à la maison » - selon l'expression du Président de la République à Johannesburg. De plus, si les ressources devaient être épuisées, l'augmentation de température serait de toutes façons considérable, même si le rythme de consommation diminuait de 10, 20 ou 30 %.

Les sceptiques font valoir, d'autre part, qu'un effort national est inutile si les

autres pays ne font pas le même (1). Or pour stabiliser les concentrations dans l'atmosphère, il faudrait que l'ensemble des émissions soit divisé par deux ou trois. Comment être sûr que cela soit possible alors que d'immenses pays commencent une phase de puissant développement économique ? Par quel moyen seront-ils convaincus ou contraints de se priver de pétrole et de gaz et de ne pas utiliser leurs énormes ressources en charbon ? Si la technique de la séquestration du gaz carbonique dans le sous-sol ou dans les couches océaniques profondes est techniquement viable, qui les obligera à dépenser les sommes nécessaires ?

Ce n'est pas pour se prémunir de la pénurie ni, évidemment, pour contenir à lui seul la hausse des températures que notre pays doit limiter ses émissions de gaz à effet de serre ; c'est pour une autre raison, bien plus forte. Même si son action ne pouvait avoir aucun effet sensible sur la température, il y a là une nécessité d'ordre « moral » si l'on veut, en tout cas d'ordre stratégique.

La façon dont les pays développés alimentent ou combattent l'effet de serre sera vue comme une marque significative de l'attention qu'ils portent à l'avenir des autres pays, particulièrement ceux qui souffriront le plus des effets du changement climatique pour la double raison que les dommages seront chez eux plus marqués qu'ailleurs et qu'eux-mêmes

(*) Voir sur le même thème, du même auteur : « Sécurité d'approvisionnement et lutte contre l'effet de serre. Une contribution au débat sur l'énergie » dans *Esprit*, août-septembre 2003, p. 172-192

(1) Telle est la position du Gouvernement britannique dans son Livre Blanc sur l'énergie (Cf. encadré).

auront moins de moyens de s'en préserver. La politique de chaque pays développé contre l'effet de serre sera donc une composante forte de ses relations avec les pays en voie de développement. Ajoutons que, même sans pénurie physique, une forte consommation d'énergie fossile causera une augmentation des prix bénigne pour les pays développés mais lourde pour les pays du Sud.

Il est habituel, enfin, de penser qu'un effort est impossible s'il n'est pas coordonné au niveau mondial ou, au moins, européen. Or, pour réduire les émissions de gaz à effet de serre, il nous est possible d'agir de façon spectaculaire même si nous sommes les seuls à le faire car les moyens efficaces relèvent de la décision nationale et ne pénalisent pas la situation compétitive du pays.

Il ne serait donc pas raisonnable d'expliquer un refus d'agir ou simplement une inaction par le fait que les autres pays n'agiraient pas.

Le Premier ministre a annoncé dans son discours inaugurant le débat public sur l'énergie que l'objectif de la France est de diviser les émissions de gaz à effet de serre par quatre en cinquante ans. Comme contribution au débat et dans la perspective de la loi de programmation sur l'énergie, cet article esquisse un scénario de division des émissions par trois en trente ans (2) qui implique un réel changement de nos comportements mais sans bouleverser notre genre de vie et en n'utilisant que des techniques connues aujourd'hui.

Auparavant, quelques chiffres montreront pourquoi la pénurie d'énergie fossile ne nous menace pas dans les cent années à venir.

L'énergie fossile est abondante, sauf risques politiques

Le bilan énergétique provisoire de la France publié par la DGEMP dit que la consommation française d'énergie primaire en 2002 fut de 267 Mtep (millions de tonnes d'équivalent pétrole). La consommation d'énergie finale fut de 162 Mtep. La différence entre consommation primaire et finale s'explique par les pertes en ligne de l'électricité et par le fait qu'à la production d'énergie

nucléaire correspond, par convention, une quantité d'énergie primaire égale à peu près au triple ; par ailleurs l'énergie « primaire » inclut des produits dont l'usage n'est pas énergétique, dont nous ne tenons pas compte dans la suite.

La production nationale d'énergie primaire est de 134 millions de TEP soit exactement la moitié de la consommation primaire, donnant à notre pays un « taux d'autonomie » de 50 %, chiffre dont l'apparence rassurante peut prêter à illusion.

Les sources primaires d'énergie d'origine nationale sont pour l'essentiel utilisées pour la production d'électricité : 120 Mtep dont 114 (pour une production de 440 TWh) d'origine nucléaire et 6 d'origine hydraulique.

Quant aux autres ressources énergétiques, outre les productions nationales de charbon, de gaz et de pétrole (5 Mtep en tout), l'énergie produite à partir de bois est de 9 Mtep et les autres ressources renouvelables (utilisation des déchets, chauffage solaire, éoliennes) produisent moins de 3 Mtep.

La France importe 86 Mtep de pétrole brut dont 37 % provenant de la Mer du Nord, 37 % également du Moyen-Orient, 16 % d'Afrique et 10 % d'autres origines. Elle importe 36 Mtep de gaz dont 30 % de Norvège, autant de l'ex-URSS, 25 % d'Algérie et 15 % d'autres origines. Elle a importé également 12 Mtep de charbon. La « facture énergétique » de la France, c'est-à-dire la différence entre le prix des matières importées (produits bruts et produits pétroliers raffinés) et celui des exportations (produits raffinés et électricité) est de 21,7 milliards d'euros (G€), soit 1,4 % d'un PIB de 1500 G€, ratio qui avait atteint en 1981 la valeur de 6,1 %. Or les ressources mondiales sont encore abondantes.

Alors que les « réserves » sont les quantités exploitables aux conditions techniques et économiques qui prévalent au moment où elles sont calculées, les « ressources » représentent les quantités existantes, telles qu'on les connaît ou telles qu'on pense qu'elles existent. Les réserves peuvent donc augmenter pour plusieurs raisons : le progrès technique, l'augmentation des prix, la découverte de nouvelles ressources.

Les quantités de carbone fossile accessibles permettent de répondre à la demande pendant plus d'un siècle

Dans une perspective à long terme, il est donc utile de se référer non seulement aux réserves telles qu'elles sont vues aujourd'hui mais aussi aux ressources.

Les réserves conventionnelles et non conventionnelles de gaz et de pétrole sont en tout de 280 Gtep (Gigatep, c'est-à-dire milliards de tep) alors que les ressources sont estimées en tout à 1 250 Gtep. Quant au charbon, les réserves sont de 1 100 Gtep, les ressources étant de 3 700 Gtep. Si l'évolution des prix et de la technologie le permet, l'exploitation de 70 % des ressources conduirait à une production cumulée de 3 500 Gtep - cela sans tenir compte des énormes quantités d'hydrates de méthane, un corps qui se présente sous forme solide dans les zones arctiques et, au fond des océans, dans les marges continentales un peu partout dans le monde.

Quant aux réserves d'uranium, matériau dont le prix aujourd'hui est très bas, elle augmenteront considérablement avec le prix ; elles ne connaîtraient plus de limite avec un prix permettant de récupérer l'uranium présent dans l'eau des océans, un niveau de prix que la production d'électricité pourrait rémunérer. Aujourd'hui, la consommation d'énergie fossile est de 7,5 Gtep/an environ et pourrait augmenter au rythme de 1,7 % par an selon les prévisions de l'AIE sur trente ans. Même si elle continuait d'augmenter au même rythme pendant 70 ans pour atteindre 24 Mtep et plafonner à ce niveau au-delà, soit en tout 1 700 Gtep en cent ans, les quantités de carbone fossiles accessibles après une hausse de prix permettront de répondre à la demande pendant beaucoup plus d'un siècle puisque les réserves aux conditions actuelles sont aujourd'hui de 1 400 Gtep.

Cette abondance physique ne doit évidemment pas cacher le risque de rupture d'approvisionnement à la suite de troubles politiques, d'actes d'agression ou de terrorisme.

Il s'agit de crises qui interviennent brutalement et qui demandent, en conséquence, une réponse rapide, sachant

(2) Il s'agit des émissions par personne de gaz carbonique liées à l'énergie.

que la défaillance brutale ne serait-ce que de 15 % de nos besoins se ferait durement sentir sur la vie de la population. Notre « taux d'autonomie » de 50 % ne nous serait alors d'aucune aide. Nous devons donc, d'une part, essayer de nous préserver de la crise et, d'autre part, nous organiser pour que les conséquences soient supportables. Pour se préserver de ces crises, il existe un moyen : les stocks stratégiques. Ceux-ci seront pleinement efficaces si leur capacité est suffisante pour attendre la fin de la crise d'approvisionnement. Aujourd'hui les stocks de produits pétroliers sont de trois mois de consommation ce qui, en permettant par exemple de suppléer pendant six mois une diminution de l'approvisionnement de 50 %, laisse le temps de régler les causes de la pénurie. Il n'en est pas de même du gaz. La France, qui dispose de formations géologiques favorables à la création d'importantes capacités de stockage, pourrait proposer à d'autres pays de l'Union européenne qui prévoient d'augmenter beaucoup leur consommation de gaz d'abriter une partie de leurs stocks stratégiques.

La hausse des températures

Peut-on avoir seulement une idée, en ordre de grandeur, de la hausse de température qui serait causée par la combustion de toutes les énergies fossiles accessibles ? C'est évidemment extrêmement compliqué et les marges d'incertitude ouvertes par notre ignorance des phénomènes en cause est considérable. Le Giec, groupe intergouvernemental pour l'étude du climat, s'est mis d'accord pour dire que la relation entre l'élévation de température d'équilibre et la concentration en équivalent gaz carbonique des gaz à effet de serre ressemble à une fonction logarithmique, mais les incertitudes scientifiques sont encore très grandes. La teneur avant l'ère industrielle était de 280 ppm ; elle est aujourd'hui de 370 ppm. Le Giec a recherché des profils d'émissions qui ont comme résultat une stabilisation des teneurs à différents niveaux, de 350 ppm (niveau de 1990) à 1000 ppm. Dans ce dernier scénario (dit WRE 1000) la courbe d'émission part de 7 GTC (3)

en 1990 pour dépasser 14 en 2050, atteindre 15 en 2080 puis décroître jusqu'à 5 GTC en 2290. Dans les 30 premières années, les émissions seraient en croissance de 2 % par an puis augmenteraient de moins de 1 % par an. Ce scénario est proche des prévisions faites par l'AIE (Agence internationale de l'énergie) : une croissance de 1,8 % des émissions jusqu'en 2030 (pour une croissance de la consommation d'énergie de 1,7 %). Alors la température d'équilibre de l'atmosphère sera supérieure à la température moyenne de l'année 1990 de 3,5 à 8,7°C (4) ; comme l'augmentation sera plus forte en moyenne sur les continents et qu'elle connaîtra de grosses différences d'une région à l'autre, ces perspectives sont grosses d'incertitudes redoutables sur la violence des phénomènes atmosphériques, sur les risques de sécheresse ou d'inondation, sur l'évolution de la végétation. Sans doute les pays développés seront-ils moins touchés de par leur situation géographique et seront-ils mieux à même de réagir grâce aux moyens dont ils disposent (5). Dans le scénario WRE 450, la teneur se stabilise à 450 ppm ; alors l'augmentation de la température d'équilibre moyenne serait comprise entre 1,5 et 4 °C - la largeur de la fourchette due à l'incertitude scientifique ne doit pas cacher qu'il s'agit là d'une élévation de température déjà considérable. Or, point à retenir, les quantités de carbone émises dans le scénario WRE 450 en 300 ans sont le tiers des quantités émises dans le scénario WRE 1000, 1000 GT de carbone contre 3000 en chiffres ronds. Dans 60 ans, selon ce scénario, les émissions mondiales seraient divisées par deux et dans cent ans par quatre. Nous n'essayerons pas ici d'imaginer comment des peuples qui ont faim d'énergie pourront ne pas consommer une énergie disponible mais comment et dans quelle mesure, en France, nous pouvons diminuer nos propres émissions à la mesure des enjeux.

Un scénario rigoureux

Il s'agit dans la suite de diviser par trois en trente ans les émissions par personne

causées par la consommation d'énergie fossile.

Dans une première étape, on explore les possibilités physiques de production d'énergie « sans carbone » autres que l'électricité et l'on examine à grands traits les possibilités physiques de diminution de la consommation. On ne retiendra là que les technologies éprouvées et l'on ignorera des scénarios qui supposeraient un bouleversement de notre genre de vie. On calculera alors par différence la production d'électricité qui permet d'équilibrer ressources et consommation et l'on vérifiera si de telles perspectives sont réalistes. Ensuite, on dressera un tableau des ressources et utilisations par grand secteur. Ce scénario permet alors de proposer des repères pour essayer de prévoir quels seront les prix et d'entrevoir les mutations industrielles nécessaires à une forte réduction des émissions de gaz carbonique. Dans cette logique, prix et réglementations sont ajustés pour que la consommation soit celle qui est visée. La démarche est donc différente de celle qui a présidé à la formation d'autres scénarios (scénarios du Plan, de la DGEMP et de la Mies), qui commence par calculer les consommations en fonction du contexte général et de coefficients techniques qui souvent prolongent les tendances récentes (6).

En 2000, les émissions françaises de gaz carbonique causées par la consommation d'énergie étaient de 106 MTC, ainsi réparties : transports, 38 % ; résidentiel et tertiaire, 26 % ; industrie, 20 % ; centrales électriques, 10 % ; et autres, 7 %. Notons ici que si l'électricité nucléaire était produite à partir de gaz, les émissions de gaz carbonique seraient supérieures de 35 ou 40 MT de carbone (MTC).

Les émissions de gaz carbonique liées à la consommation d'énergie seront diminuées en réduisant les quantités d'énergie consommées ou en remplaçant une

(3) 1 GTC est la quantité de gaz carbonique qui contient 1 milliard de tonnes de carbone.

(4) Cf. le « synthesis report » du Giec, 2001, p 139.

(5) Voir notamment le livre de Michel Petit : « Qu'est-ce que l'effet de serre ? Ses conséquences sur l'avenir du climat » - Vuibert (collection Planète vivante) avril 2003.

(6) Voir le rapport du CGP : « effet de serre : modélisation économique et décision publique » (Documentation française mars 2002).

partie des énergies qui émettent du gaz carbonique par d'autres qui n'en émettent pas (7). Une troisième méthode fait l'objet d'études : la séquestration du gaz carbonique en vue de le stocker quelque part (8).

Energies renouvelables : un concept trompeur

Les énergies qui n'émettent pas de gaz carbonique sont l'énergie nucléaire et ce que l'on regroupe sous le vocable « d'énergies renouvelables », agrégat qui appelle un commentaire.

En effet on trouve ensemble sous cette appellation l'énergie du traitement des déchets, chaleur d'incinération ou biogaz de méthanisation, le bois et d'autres végétaux (la biomasse), l'énergie éolienne, le chauffage solaire, l'énergie photovoltaïque, l'eau des barrages et le fil de l'eau, la houle, les marées, l'énergie géothermique. Ces énergies ont sans doute ceci de commun que leur « matière première » est bon marché et inépuisable mais cela ne doit pas cacher qu'elles sont extrêmement différentes de bien des façons. Ainsi l'énergie de l'eau des barrages et celle du fil de l'eau sont de nature différente puisque cette dernière produit une électricité de « base » alors que l'eau des barrages utilisée en pointe peut valoir dix fois plus ; l'énergie issue des déchets est délivrée de façon continue, celle venant du soleil de façon périodique et prévisible, celle issue du vent de façon imprévisible etc.

Pour éviter les confusions, il importe donc de différencier ces « énergies renouvelables » car des dispositions tout à fait justifiées pour certaines peuvent être tout à fait inadaptées à d'autres.

L'énergie des déchets organiques est récupérée soit sous la forme de chaleur d'incinération, soit sous forme de biogaz de méthanisation ou de décharge. Il est habituel de produire de l'électricité à partir de cette chaleur ou à l'aide de moteurs à explosion alimentés par le biogaz. Cette électricité a la nature économique d'une électricité « de base », comme l'électricité nucléaire. Pour lutter contre les émissions de gaz à effet de serre il est bien préférable d'utiliser l'énergie des déchets sous forme de chaleur après incinération ou fermentation

ou encore, si le biogaz de fermentation est exempt de matières nocives, d'en extraire un méthane assez pur pour être réinjecté dans les conduites de gaz. Il existe d'autres techniques pour récupérer l'énergie, comme la gazéification. Les déchets organiques des ménages, des commerces et des entreprises agroalimentaires pourraient fournir 3 Mtep/an sous une forme ou sous une autre.

L'électricité éolienne est aussi une énergie dont le coût de la source primaire est nul. Mais peut-on considérer qu'une éolienne,

seule, est un moyen de production d'électricité ? Comme l'électricité ne peut pas être stockée, n'est-on pas en droit d'attendre d'un moyen de production qu'il... produise lorsque on en a besoin ? Or, par vent trop faible ou trop violent, l'éolienne s'arrête. Comme les chutes ou les excès de vent sont imprévisibles, à toute capacité de production éolienne doit être associée une capacité de puissance égale qui puisse prendre la relève, turbine à gaz, au fuel ou au charbon, ou eau des barrages. De la sorte, le parc de production français sera calculé sans éolienne ; les éoliennes permettront d'économiser des émissions de gaz à effet de serre lorsque leur production se substituera à une production qui rejette du gaz carbonique, donc autre que nucléaire ou hydraulique - c'est-à-dire, en France, l'équivalent de 700 heures de production (35 % - le taux de disponibilité des éoliennes - de 2000 heures - la durée pendant laquelle fonctionnent des moyens de production fossiles, lorsque le parc de production est optimal -) (9).

L'électricité au fil de l'eau est une production propre et fiable qui vient, elle aussi, en remplacement d'électricité nucléaire. Ce scénario ne suppose pas que ce type de production augmente.

L'électricité des barrages est la forme la plus noble d'électricité : propre, disponible immédiatement dès qu'on en a besoin et d'un coût très faible une fois le barrage réalisé. C'est donc une électricité de pointe non coûteuse et non polluante, à la différence de celle des turbines à combustion ou, pour l'extrême pointe, des moteurs diesel. Les sites sont déjà bien équipés mais une forte augmentation du prix de l'électricité condui-

Le bois et la biomasse végétale sont les sources d'énergie renouvelable qui ont le plus fort potentiel de croissance

rait à augmenter la capacité de quelques barrages et à en construire quelques autres. Dans ce scénario, la capacité nouvelle sera comptée pour 0,5 Mtep/an.

Le solaire thermique est la forme d'énergie que nous utilisons le plus sans même nous en rendre compte.

Cette énergie ne peut pas se transporter mais peut se stocker quelques heures à la différence de l'énergie éolienne. Sa

source est prévisible et active même avec des nuages. Elle paraît donc bien convenir pour des chauffe-eau ou pour le chauffage des locaux. La subvention de l'ADEME pour les chauffe-eau, équivalente à environ 200 € par tep, est insuffisante pour que se développe cette technique, ce qui veut dire que le surcoût est supérieur, *a fortiori* le surcoût du chauffage des locaux. Mais un scénario de division des émissions implique une plus forte augmentation des prix (voir ci-dessous). Malgré cela la progression du chauffage solaire ne peut être que lente car il doit être pris en compte dès la conception du logement. Par ailleurs, il s'applique mal aux logements collectifs et, souvent, doit être complété par un

7) Il est convenu de compter pour zéro les émissions de gaz carbonique issues de la combustion de produits organiques car on estime que cette combustion ne fait qu'accélérer le cycle du carbone sans augmenter les teneurs dans l'atmosphère à la condition, bien sûr, concernant le bois, que les coupes soient suivies d'un reboisement, naturel ou cultivé. Quant à la production de biocarburant, nous comptons dans ce scénario la production d'énergie nette, donc déduction faite de l'énergie consommée pour la produire, une énergie issue de la biomasse elle-même.

(8) La « séquestration » du gaz carbonique ne contribue efficacement à la lutte contre le changement climatique que si elle accompagne la production d'un vecteur d'énergie qui ne contient pas de carbone fossile, c'est à dire de l'électricité, de l'hydrogène ou encore une huile ou un gaz produit à partir de biomasse.

(9) On pourrait considérer que le véritable moyen de production est un assemblage fait d'éoliennes et d'un autre moyen de production qui supplée les éoliennes quand elles ralentissent ou s'arrêtent. Ce moyen complémentaire doit être assez souple pour remplacer sans préavis la puissance éolienne manquante. Ce ne sera donc pas du nucléaire ni un cycle combiné au gaz, mais une turbine à combustion au charbon ou au fuel ou l'eau des barrages. Chaque assemblage aura donc une puissance nominale égale à la puissance maximale de l'éolienne, un coût d'investissement égal à l'investissement total en éolienne et installation complémentaire pour cette capacité et un coût marginal de fonctionnement égal à la moyenne pondérée des coûts marginaux de l'éolienne et du moyen de secours. Ainsi, en dehors des heures de pointe, les éoliennes françaises permettront d'éviter des émissions de gaz carbonique... en Allemagne ou dans tout autre pays qui refuse le nucléaire. Le surcoût doit-il être payé par le consommateur français ?

chauffage « classique ». Comme l'on construit 300 000 logements par an dont la moitié de maisons individuelles, le scénario présenté ici prévoit, pour le logement et le tertiaire neuf, 2 Mtep/an dans les trente ans. Avec une bonne pénétration du chauffe eau solaire dans les constructions existantes, ce chiffre pourrait être porté à 3 Mtep/an (10).

L'électricité photovoltaïque coûte encore très cher. De plus, elle disparaît avec le soleil c'est à dire, sous nos latitudes, fort tôt dans les saisons froides. Pour que ce mode de production trouve une place d'ici trente ans, il faudrait de très gros progrès techniques sur les capteurs solaires et le stockage de l'électricité ; nous n'en tiendrons pas compte dans ce scénario.

Le bois et la biomasse végétale sont dans les décennies à venir les sources d'énergie renouvelable qui ont le plus fort potentiel de croissance. Sur les 100 millions de mètres cubes que produit chaque année la forêt, 60 seulement sont exploités. Si une partie seulement de ce qui reste était broyée en copeaux pour alimenter des chaufferies collectives, c'est 30 Mm³ de plus que l'on récupérerait chaque année. Mais les plus grandes possibilités de progrès de la forêt ne sont pas là. Sur les 16 millions d'hectares de forêt, les deux tiers sont des taillis peu productifs. Tous ne peuvent pas être améliorés mais le boisement en arbres à croissance rapide (20 m³/ha/an) de 3 millions d'hectares et l'amélioration de la culture sur 3 autres millions d'hectares augmenteraient la production de 70 Mm³ par an, ce qui au total procurerait 100 Mm³. Il est également possible de récupérer pour 10 MT de résidus agricoles. Par ailleurs, sur les terres agricoles il est possible de faire des cultures à finalité industrielle, betterave, blé ou soja par exemple, à très haut rendement sur 5 millions d'hectares.

L'utilisation énergétique la plus efficace du bois est la chaleur ; il dégage alors 1 tep pour 4 m³. Mais cet usage sera limité par les possibilités d'accès aux logements et il ne peut être encouragé (voire autorisé) que dans le cas de chaufferies collectives équipées d'épurateurs de fumées. La quantité de bois de chauffage sera donc limitée par la capacité d'accès aux locaux chauffés, qui elle-même

dépend beaucoup des réseaux de chaleur.

Nous expliquons plus loin pourquoi, dans ce scénario, toute la production de bois qui ne sera pas employée comme bois d'œuvre, bois d'industrie ou bois de chauffage sera utilisée pour faire du biocarburant, que l'on peut produire également avec le blé, le colza, les betteraves. La production actuelle de biocarburant est de 0,3 Mtep avec un rendement de 1 tep nette par hectare. Les techniques de gazéification puis synthèse par voie autothermique permettent d'espérer une production de 3 Tep net par hectare. Dans ce scénario, nous supposons que dans 30 ans, 34 Mm³ de bois et 10 MT de déchets agricoles procureront 11 Mtep de chaleur de plus qu'aujourd'hui et que la production de biocarburant sera de 2,5 tep net par hectare et de 1 tep net pour 7 m³ de bois, soit, avec 5 millions d'hectares et 66 Mm³ de bois, une production totale de 22 Mtep/an de biocarburant.

Il est parfois question d'utiliser la biomasse pour produire de l'électricité. S'agissant de diminuer les émissions de gaz à effet de serre, cela n'aurait d'intérêt que pour produire de l'électricité de pointe à la place de charbon, de fuel ou de gaz, hypothèse que ce scénario ne retient pas.

Perspectives à plus long terme

Concernant la forêt, pour parvenir à ce résultat il ne suffira pas d'une augmentation du prix du bois puisque l'exploitation forestière est en générale moins active que ce que justifierait, d'un point de vue économique, les prix en vigueur. Les freins tiennent non pas au morcellement de la propriété forestière mais à ce que l'économie de la forêt présente des spécificités dont on a jusqu'ici insuffisamment tenu compte. La première, qui intervient peu dans le cas qui nous occupe, concerne la relation entre l'offre et la demande de bois : une plus forte demande a généralement comme effet de bloquer l'offre (en simplifiant : si la demande augmente, les prix vont augmenter, il convient donc de retarder la

vente des bois). L'autre blocage est d'ordre financier : une sylviculture est faite de périodes de dépenses et de moments de recettes lorsque le sylviculteur vend des bois, bois de trituration d'abord puis bois d'œuvre. Le seul financement externe qui convienne est donc un prêt remboursable intérêt et capital aux moments où le sylviculteur vend des bois. Ces prêts existent mais sont fort rares faute d'un refinancement suffisant

de sorte que des opérations dès aujourd'hui rentables comme l'éclaircie ou la plantation de certaines essences sont empêchées par le manque de financement. Un tel financement permet d'effacer le handicap du morcellement de la propriété : par exemple une coopérative forestière ou un exploitant forestier peut alors contracter avec plusieurs propriétaires voisins pour réaliser les travaux et se faire payer quelques années plus tard par la cession gratuite de bois, la coopérative ou l'exploitant finançant eux-mêmes les travaux à l'aide d'un prêt à remboursement et intérêts différés jusqu'au moment où ils recevront ces bois (11).

La production nucléaire, qui génère des déchets dangereux à vie très longue, ne peut être considérée comme une solution durablement satisfaisante. La perspective d'un nouveau mode de production par fusion nucléaire, d'ici une cinquantaine d'années, peu à peu prend corps. Cela permet de penser qu'à l'échéance d'un siècle l'homme aura les moyens de produire en abondance de l'énergie sans risque et, peut-on espérer, sans laisser de déchets à vie très longue. Aujourd'hui, il est tout à fait légitime de refuser par principe un risque très grave aussi peu probable soit-il, de refuser également la production de déchets dangereux à vie très longue même s'ils sont très peu abondants. Alors, il ne serait pas cohérent de tirer argument de ce refus pour seulement diminuer les capacités de production d'électricité nucléaire ; il

((10) Une autre façon d'utiliser l'énergie solaire pour le chauffage pourrait se développer : la récupération de la chaleur reçue du soleil par le sol, à l'aide d'un réseau enterré à un mètre de profondeur et d'une pompe à chaleur - technique dite de la pompe géothermale.

((11) On peut se référer à « l'économie de la forêt - mieux exploiter un patrimoine » - H. Prévot Edisud.

Note sur le Livre Blanc Britannique

« Our energy future - creating a low carbon economy » (février 2003)
Il donne une cible, diminuer les émissions de 60 % en cinquante ans, et propose de ne prendre des mesures à cette fin que lorsqu'un dispositif mondial efficace sera institué ; il énonce les possibilités techniques sans en chiffrer le coût et sans leur fixer de cibles quantitatives ; il manifeste une grande confiance dans le marché tout en ajoutant qu'il appartient à l'Etat de fixer le cadre. Il estime qu'une réduction d'émissions de 60 % porterait le « coût du carbone » à 200 ou 400 livres par tonne (soit 500 €/tonne) ; l'effet sur le PIB sera extrêmement faible. Le Livre Blanc propose comme cible que 30 à 40 % de l'électricité soit produite par des énergies renouvelables (outre le vent et la biomasse, il cite les marées et la houle) et propose d'engager un important programme de recherche sur la séquestration du carbone et la fusion nucléaire. L'option nucléaire n'a pas été exclue par principe ; elle n'a pas été retenue à ce stade pour des motifs économiques ; à la lecture du document, on peut supposer que le nucléaire deviendra tout à fait compétitif lorsque les prix tiendront compte de l'objectif des réductions des émissions.

faudrait les refuser *toutes*. Par contre, si l'on aborde d'une autre façon le risque, si l'on en évalue la probabilité et les dommages, on calcule que le coût imputable aux risques est très inférieur à l'avantage que procure ce mode de production par rapport à un mode générateur d'émissions de gaz à effet de serre (12). Cela suppose bien sûr que les conditions de fonctionnement des centrales soient favorables à la sécurité de fonctionnement. Quant aux déchets à vie longue, la production est aujourd'hui de 600 tonnes par an, ce qui correspond à un cube de quelques mètres de côté. Dans l'hypothèse où la production serait doublée et durerait encore une centaine d'années, il est possible de cal-

culer le volume maximum de déchets issus de la production d'électricité nucléaire. Certes, en cas de rupture de l'ordre public, ces déchets pourraient faire des ravages ; mais en de telles circonstances, l'histoire récente a montré, du Rwanda à New-York, qu'il y a bien d'autres façons de faire des ravages : il ne s'agit pas d'un problème de déchets mais d'un problème d'ordre public. La production d'électricité avec du charbon et séquestration du gaz carbonique répondrait aux objectifs de réduction des émissions et tirerait parti des abondantes ressources de charbon. Il faut donc l'étudier attentivement. On se bornera ici à dire que cette technique ne trouve sa place que si l'on a la possibilité de séquestrer ce gaz, soit au fond des mers,

soit dans des puits exploités, soit encore dans les nappes d'eau souterraine où le gaz carbonique serait partiellement dissous. Naturellement il faudra avoir acquis une certitude suffisamment forte sur la stabilité de ce stockage. Le remplacement de la production d'électricité nucléaire actuelle (environ 400 TéraWh) par une production à partir de gaz obligerait à séquestrer chaque année 76 kilomètres cubes de gaz carbonique (normaux), deux fois plus si la production est faite à partir de charbon ; c'est beaucoup (13).

Comme alternative à l'énergie nucléaire, pour diminuer les quantités de gaz carbonique à séquestrer, le couplage d'éoliennes (dont le

taux de disponibilité est de 35 %) et de centrales à charbon ou au gaz doublerait le coût de l'investissement mais diminuerait le coût marginal de production d'électricité. Il faut mentionner ici la production d'hydrogène à partir de combustible fossile et avec séquestration du gaz carbonique. Nous ne le retenons pas dans ce scénario, car les coûts de manutention et de distribution de l'hydrogène sont trop élevés (600 à 800 €/tep selon les estimations).

Diminuer la consommation d'énergie finale

Pour dresser le tableau des ressources et des emplois de l'énergie, il ne suffit pas

de raisonner à population constante car certaines ressources butent sur des contraintes physiques. Nous retenons donc une hypothèse de croissance démographique de 7,5 % en trente ans (celle qui est retenue par l'Observatoire de l'énergie : 0,3 % par an pendant quinze ans et 0,18 % au-delà).

L'industrie et l'agriculture consomment 41 Mtep. Les entreprises grosses consommatrices d'énergie fossile, qui sont responsables de 20 % du total des émissions nationales, ont fait l'objet de réflexions approfondies et de longues discussions. Sous l'aiguillon de la concurrence, ces entreprises ont fait de gros progrès. Comme il ne serait pas de bonne politique de charger des entreprises soumises à la concurrence internationale de contraintes qui les handicapaient, les décisions les concernant ne peuvent être prises qu'au niveau communautaire. Nous supposons que leur consommation d'énergie reste constante.

De la même façon, la consommation d'énergie du transport de marchandises, aux 100 km, ne peut sans doute pas beaucoup baisser sauf utilisation, pour la circulation urbaine, de moteurs pouvant être alimentés en électricité (voir, plus loin, la note 15). L'augmentation de consommation pourrait sans doute être contenue par une meilleure utilisation des camions. Ce scénario suppose que la consommation passe de 21 à 24 Mtep - une augmentation de 15 %, sans doute,

(12) Prenons un cas aussi grave que l'accident de Tchernobyl. Bien que toute estimation soit éminemment contestable, retenons un coût de 4000 milliards d'euros et multiplions-le par une probabilité de un millionième par réacteur et par an, selon une indication donnée par la direction de la sécurité nucléaire. Pour 60 réacteurs, l'« espérance mathématique » des dommages est chaque année de 4 fois 10 puissance 12 multiplié par 60, divisé par 10 puissance 6 soit 240 million d'euros. Or la production d'électricité nucléaire est chaque année de l'ordre de 400 térawatt heures soit 400 milliards de kWh. Avec ces données, la probabilité de coût est donc de 6 centième de centime d'euro par kWh, soit 6 € par tonne de carbone atmosphérique évitée en comparaison avec une production d'électricité à partir de gaz.

(13) 12 grammes de carbone sous forme de CO₂ occupent 22,4 l dans les conditions normales de température et de pression ; donc 1 Kg occupe 1,9 mètre cube, et une tonne 1900 mètres cubes. Avec une turbine à gaz très performante, pour faire 1MWh électrique il faut environ 2 MWh thermique soit 0,17 Tep qui émettent 0,1 tonne de carbone. Donc pour faire 400 TWh électrique, il faut émettre 40 MT de carbone sous forme de gaz carbonique, occupant 76 milliards de mètres cubes à la pression atmosphérique, un cube de 4,2 km de côté chaque année - de 5,3 km de côté si la production d'électricité est double.

TABLEAU I
Tableau d'ensemble de la consommation d'énergie finale et comparaisons

M tep	En 2002*	Dans 30 ans scénario	D'autres références			
			En 1973	En 1990	Dans 30 ans	
					Tendanciel 1 Cf ci-dessous	Tendanciel 2 Cf ci-dessous
Industrie agriculture	41	41	51	41	41	41
Transport	51	48	26	41,7	74	60
Marchandises	21	24				
Personnes	30	24				
Résidentiel et tertiaire	70	65	56	59,3	97	75
Electricité spécifique	13	15				
Chauffage, ECS	57	50				
Total	162	154	134	142,6	212	176

Source : DGEMP – bilan énergétique provisoire.
Tendanciel 1 : prolongement linéaire des évolutions constatées depuis 1 ans.
Tendanciel 2 : la consommation de l'industrie est constante la consommation par personne des transports et du résidentiel et tertiaire progresse au même rythme moyen que de 1973 à aujourd'hui.

TABLEAU II
La comparaison avec le scénario tendanciel de la DGEMP et le scénario « avec mesures existantes » (AME) de la Mies est plus difficile car ceux-ci portent jusqu'en 2020 et les valeurs de consommation ont été calculées selon une méthode aujourd'hui abandonnée.

Ancienne façon de compter la consommation	1990	Scénario AME de la Mies		Scénario tendanciel DGEMP	
		Valeur 2020	croissance en 30 ans	Valeur 2020	croissance en 30 ans
Transport	45,3	68	+ 50 %	79	74 %
Résidentiel et tertiaire	84,1	121	+ 44 %	126	50 %

mais bien plus faible que la tendance des années récentes.

Le chauffage des locaux de l'habitat et du tertiaire est un gros poste de consommation. Les nouvelles normes d'isolation thermique étant très exigeantes, les progrès sur la normalisation n'auront plus guère d'effet sur la consommation. Par contre celle-ci diminuera au fur et à mesure que ces normes seront davantage mises en œuvre, avec la construction des nouveaux logements et avec l'isolation thermique des locaux existants. Si la construction de logements nouveaux est chaque année de 1 % (c'est le rythme actuel), si les travaux d'isolation portent sur la moitié des logements existants et si l'isolation se traduit par une économie de 25 % des consommations (hypothèses retenues dans ce scénario), la consommation par logement aura en moyenne diminué en trente ans de 9 %. L'économie peut être plus importante si la température intérieure diminue : une baisse de 1 % engendre en effet une diminution de la consommation de 7 %. Comme la température intérieure a augmenté ces dernières années, ce scénario suppose que la température moyenne diminuera de

1,5 % (14). En tout, on suppose ici que la consommation d'énergie pour le chauffage (y compris l'eau chaude sanitaire)

diminuera en tout de 20 % à population constante, soit de 12,5 % en réalité, passant de 57 Mtep à 50 Mtep.

Naturellement, ce scénario ne tient pas compte des économies de chauffage liées au réchauffement prévisible d'ici 30 ans - 7 % si ce réchauffement est de 1°C.

Le transport des personnes, pour l'essentiel les voitures particulières, consomme 30 Mtep. Il est techniquement possible de diminuer la consommation totale même en augmentant la mobilité à laquelle les Français sont très attachés.

Le rendement des moteurs peut être singulièrement amélioré surtout en ville (la consommation en ville est de 40 % du total) avec des moteurs « biénergie » formés d'un moteur électrique alimenté par une batterie qui est rechargée par un moteur thermique qui tourne à régime constant, donc au meilleur de son rendement, cette batterie étant également rechargeable sur le secteur. En effet une tep électrique (c'est-à-dire 11 000 Kwh)

remplace plus de 3 tep de carburant liquide. Autre avantage : ce genre de moteurs permettra également de diminuer beaucoup la pollution locale. La consommation pourrait également

être très inférieure si les voitures étaient moins lourdes et si la conduite était plus économe. Par ailleurs, des véhicules urbains de petite taille pourraient avoir une consommation de 2 l aux 100 kilomètres. Notre scénario suppose que la consommation d'électricité par le transport en commun doublera, passant de 1 à 2 Mtep, grâce à une électrification du parc et une utilisation plus importante de ce type de transport, et que l'on verra en ville des véhicules biénergie mus à l'électricité consommant 3 Mtep qui se seront substitués à 9 Mtep de carburants (15). Cela, complété par les progrès des

Le financement des logements devrait tenir compte des dépenses liées aux déplacements contraints

(14) Cette baisse peut s'obtenir en ne chauffant pas les pièces inhabitées.

(15) Si 18 Mtep (et non 9) de carburant en transport de personnes et de marchandises, soit 40 % du total des transports routiers, pouvaient être remplacés par 6 Mtep d'électricité, la diminution de consommation exprimée en tep serait accrue de 6 Mtep.

rendements des moteurs thermiques, permettrait à kilométrage constant une diminution de consommation d'un tiers, la faisant passer de 30 à 20 Mtep. Mais le scénario suppose une augmentation des distances parcourues de 10 % de sorte que la consommation à population constante serait de 22 Mtep. En tenant compte de l'augmentation de la population, la consommation sera alors de 24 Mtep.

Une augmentation des prix suffira-t-elle à induire ces progrès ? Il sera sans doute nécessaire de créer de fortes incitations chez les producteurs de véhicules, qui savent orienter la demande. Une idée proposée par l'ingénieur général Yves Martin est que l'Etat accorde aux fabricants des « droits d'émettre » calculés sur la consommation spécifique des véhicules qu'ils auront vendus, libre à eux de se vendre mutuellement une partie de ces droits.

Cela ne suffira pas pourtant car, pour une part, l'usage de l'automobile n'est pas choisi mais contraint. Cette part peut être diminuée par l'urbanisme, en rapprochant les logements des gares, en développant les transports en commun, en rendant plus facile la circulation à pied et à vélo. Le télétravail pourrait diminuer les besoins de déplacement. Par ailleurs,

pour obtenir le financement de leur logement, bien des ménages sont conduits à habiter loin de la ville où ils travaillent alors même que cet éloignement leur impose de lourdes dépenses de transport ; des modalités de financement qui prendraient en considération l'ensemble des dépenses de logement et de transport pourraient avoir un effet favorable sur ces déplacements contraints.

Les impôts sur le carburant couvrent bien les coûts externes de la circulation des personnes hors des villes mais ne couvrent pas ceux de la circulation en ville. Celle-ci doit donc être limitée par des moyens spécifiques, soit en lui opposant des obstacles, comme à Paris avec l'élargissement des couloirs d'autobus, soit par un péage urbain, à l'entrée en ville ou par la tarification du stationnement. L'expérience de Londres montre l'efficacité d'un péage urbain d'un montant significatif (5 £ par jour).

Sur les autres usages de l'électricité, dits « usages spécifiques », des économies sont possibles par exemple sur la veille des appareils électroménagers, sur les pompes de chauffage central lorsque celui-ci est remplacé par un chauffage électrique mais de nouveaux usages

apparaîtront comme la climatisation. Nous supposons que, par habitant, la consommation d'électricité spécifique augmente de 15 % ; au total elle passera donc de 13 à 15 Mtep.

Au total, ce scénario ramène la consommation finale de 162 Mtep en 2002 à 154 Mtep, une baisse de 5 % après une hausse de la population de 7,5 % soit une baisse de 12 % à population constante.

Nous ne voulons pas dire ici que ce scénario est vraisemblable mais qu'il nous semble possible sans peser sur la compétitivité économique de la France et sans remettre gravement en question nos modes de vie. Pour permettre des comparaisons, à côté des valeurs de la consommation finale aujourd'hui et dans trente ans selon le scénario, on indique dans le tableau I ci-avant des valeurs calculées en prolongeant de façon linéaire l'évolution observée depuis 1973 d'une part, depuis 1990 d'autre part.

Ces comparaisons (voir les tableaux I et II) montrent que ce scénario se distingue beaucoup de l'évolution des consommations dans les années passées et des évolutions habituellement projetées.

Il faudrait construire une capacité nucléaire de 90 GW en trente ans

TABLEAU III
Répartition de l'énergie finale consommée selon les modes de production

Aujourd'hui	Charbon	Electricité	Biomasse chauffage	Chauffage solaire	Gaz	Biogaz	Biocarb,	Produits pétroliers	Total
Industrie, agriculture	6,3	11,8	1,2		12,3			9,4	41
Transport		1					0,3	49,7	51
Résidentiel tertiaire									0
Chauffage	0,6	9	9		21			17	56,6
Electricité spécifique		13							13
Total énergie finale	6,9	34,8	10,2	0	33,3	0	0,3	76,1	161,6
Consommation de fossiles pour production d'électricité	5				4			1	10
Dans 30 ans	Charbon	Electricité	Biomasse chauffage	Chauffage solaire	Gaz	Biogaz	Biocarb,	Produits pétroliers	Total
Industrie, agriculture	3	18	6		11	2		1	41
Transport		5			1	0	22	20	48
Résidentiel tertiaire									
Chauffage		28	15	3	2	1		1	50
Electricité spécifique		15							15
Total énergie finale	3	66	21	3	14	3	22	22	154
Consommation de fossiles pour production d'électricité	1				7				8

Une nouvelle combinaison des moyens de production

Diviser par trois les émissions par habitant les ramènerait de 106 MTC à 35,5 à population constante, soit 38 MTC avec une croissance démographique de 7,5 %. Selon la proportion de charbon, gaz et pétrole, cette contrainte limite la quantité totale d'énergie fossile.

Nous comptons d'abord les besoins d'énergie fossile pour la production d'électricité.

Aujourd'hui, la production d'électricité consomme 10 Mtep d'énergie fossile. Si l'on exploite complètement les possibilités du nucléaire, les combustibles fossiles ne seront utilisés que pour la consommation de pointe, concurrentement avec l'électricité des barrages (et, éventuellement, des éoliennes lorsque le vent souffle pendant les heures de pointe). Les calculs montrent qu'en considérant le profil de consommation d'aujourd'hui et en supposant que le parc de production est optimal (avec un taux d'actualisation de 5 % et en tenant compte de l'effet de serre), les besoins de production d'origine fossile sont inférieurs à 1 %. Dans ce scénario, la consommation d'électricité aura presque doublé et les capacités d'hydraulique ne vont pas augmenter dans la même proportion. Il faut également tenir compte des fluctuations rapides de la consommation - bien que celles-ci soient diminuées par la mise en réseau de toute la « plaque européenne ». Nous supposons que la production d'électricité sur énergie fossile sera de 5 % de la production totale, soit 3 Mtep, consommant 1 Mtep de charbon et 7 Mtep de gaz, qui émettent 6 MTC. Ayant compté ces émissions, on considère désormais que toute l'électricité consommée est « sans carbone ». Hors production d'électricité, les émissions doivent donc être limitées à 32 MTC ce qui, avec la combinaison de ressources fossiles de ce scénario (à peu près autant de gaz que de pétrole et très peu de charbon) limite la consommation finale d'énergie fossile, hors production d'électricité, à 39 Mtep.

Ce scénario suppose que l'industrie limite la consommation de charbon à ce qui est physiquement nécessaire (3 Mtep) et, avec l'agriculture, consomme

davantage d'électricité (18 Mtep au lieu de 12) et de bois et préfère le gaz aux produits pétroliers puisque ceux-ci seront fortement demandés comme carburant.

En effet, il existe une contrainte forte : l'énergie des transports. On a « forcé » l'utilisation d'électricité (transports en commun, véhicules bi-énergie) mais sans vouloir dépasser 5 Mtep. L'utilisation du gaz méthane restera assez limitée pour des questions de sécurité. Les quantités de biocarburant ne peuvent pas être supérieures à 22 Mtep. Il faut donc 20 Mtep de carburant pétrolier liquide.

Alors, la contrainte sur les émissions de gaz à effet de serre limite les possibilités de consommation de gaz, hors production d'électricité, à 14 Mtep ; si l'industrie en demande 10, il en restera fort peu pour le chauffage.

La consommation de bois chaleur a été fixée à 20 Mtep, limitée entre autres par les possibilités des utilisateurs.

Voilà donc un ensemble de chiffres cohérents ; cohérents entre eux et cohérents, sauf erreur, avec les possibilités physiques : possibilités des sols agricoles et forestiers, capacités techniques et industrielles, rythme d'évolution de l'habitat et de l'urbanisme (qui, entre autres choses, ralentit la pénétration du chauffage solaire).

Il va sans dire que cet ensemble, dont il ne faut retenir que les ordres de grandeur, est contestable. Mieux : il a été dressé pour servir de base à un débat.

Quoi qu'il en soit, le tableau III ci-contre est la source de quelques enseignements qui paraissent solides.

L'objectif de division par trois des émissions par personne, même s'il s'accompagne d'une réduction de la consommation, ce qui serait un changement historique, implique, tout d'abord, une forte augmentation de la consommation finale d'électricité et de la capacité nucléaire. La consommation finale d'électricité passerait, en effet, de 35 Mtep aujourd'hui à 66 Mtep. La production à partir d'énergie fossile (4 Mtep aujourd'hui) diminuerait légèrement et surtout, les exportations nettes (7 Mtep aujourd'hui), seraient ramenées à zéro (16). En tenant compte des pertes en

ligne, on calcule que la production d'électricité nucléaire passerait de 38 Mtep à 69 Mtep, soit une augmentation de capacité de 50 GW environ. Comme les deux tiers du parc nucléaire seront renouvelés dans les trente ans (40 GW sur 60), il faudrait construire une capacité de 90 GW en trente ans - en vingt ans, à vrai dire, même si la décision était prise sans délai puisqu'il faut une dizaine d'années entre la décision et la mise en route d'une centrale : 60 groupes de 1,5 GW en vingt ans, soit trois par an. Si l'on découvre des possibilités de séquestration durable de gaz carbonique, quelques centrales pourront être au gaz ou au charbon - par rapport au charbon, le gaz présente l'avantage de diviser par deux les coûts de séquestration, mais l'inconvénient d'être, à terme, beaucoup moins abondant.

L'objectif de division par trois des émissions implique, d'autre part, un développement important du chauffage au bois, qui suppose suffisamment de chaufferies collectives et industrielles et de réseaux de chaleur : dans un premier temps, les réseaux de chaleur seront alimentés au bois ou par la chaleur d'incinération des déchets et non plus au gaz ou au fioul. Parallèlement, seront créés de nouveaux réseaux de chaleur.

Enfin, dernière implication de cet objectif de division par trois : une importante consommation de biocarburant. Ce fut une surprise de le constater en dressant le tableau des ressources et des emplois, tellement l'efficacité de la biomasse comme source de chaleur est meilleure que comme matière première de biocarburant. Pourtant la place du biocarburant semble s'imposer logiquement. En effet, la contrainte de diviser par trois les émissions de gaz carbonique se traduit par une contrainte sur la disponibilité de carburant fossile. On peut sans doute bâtir des scénarios sans biocarburant mais alors 60 % de l'énergie mécanique mise en oeuvre par les transports routiers de personnes et de marchandises seraient d'origine électrique, ce qui

(16) On ne tient pas compte ici des exportations d'énergie éolienne qui permettront à d'autres pays de diminuer leur production à partir de charbon.

paraît exclu sauf percée technologique sur le stockage de l'électricité. Avec les techniques actuelles, la moins onéreuse des formes d'énergie « sans carbone » convenant au transport routier (c'est-à-dire une énergie concentrée, transportable et sûre) paraît être le biocarburant. En conséquence, ce scénario prévoit que la biomasse sera d'abord utilisée comme source de chaleur puis, de plus en plus, comme biocarburant. Nul doute que les groupes pétroliers deviendront des partenaires très efficaces du monde agricole et forestier

La disparition du chauffage au gaz peut étonner : comme on l'a dit plus haut, c'est le résultat de la contrainte sur les émissions de gaz carbonique, des exigences du transport et de la limite physique des possibilités de production de biocarburant. Pourtant, si les transports ont davantage recours à l'électricité, ils consommeront moins de carburants donc sans doute moins de carburants fossiles, ce qui « laissera de la place » pour du gaz en chauffage et en définitive diminuera un peu, par rapport à notre scénario, la consommation d'électricité. Par ailleurs on ne produira d'électricité avec du gaz que pour la pointe - sauf découverte de possibilités de séquestration du gaz carbonique.

D'une façon générale, ce scénario apparaît comme possible mais assez tendu de toutes parts : diminution de la consommation, exploitation des possibilités agricoles et forestières, augmentation de la capacité nucléaire. Une souplesse pourra-t-elle être trouvée avec un plus grand usage de l'électricité ou du gaz dans les transports ou de la biomasse dans l'industrie, ou bien avec la séquestration du gaz carbonique, ou encore grâce à la production d'hydrogène ? Il faut ici parler des coûts et des prix.

L'évolution des prix

A ce stade il est impossible de dire à quel niveau se situera le prix de l'énergie sous ses différentes formes et pour ses différents usages. Néanmoins, quelques conclusions simples et sans doute solides ressortent de ce scénario.

De tous les couples « ressource-usage », il en est qui prennent de l'importance, comme le bois de feu (augmentation de 80 %) et l'électricité de chauffage (multi-

plication par trois) ; il en est un dont le développement est radical : le biocarburant répondra à une part significative des besoins du transport, près de la moitié dans ce scénario.

Le coût de production du biocarburant deviendra donc une valeur de référence. Or aujourd'hui on peut considérer qu'il est supérieur au prix de revient en France des carburants pétroliers d'une somme à peu près égale à la réduction de TIPP dont il bénéficie, soit environ 400 €/tep ; à titre de référence, on rappelle que le brut est à 25 \$/bl environ, soit 150 €/tonne. Une production industrialisée fera baisser les coûts industriels mais une forte production pourrait faire croître le coût d'accès à la terre.

Il est économiquement rationnel d'imputer les « coûts externes » de la circulation automobile à chaque kilomètre parcouru c'est-à-dire, pour simplifier, à chaque litre de carburant (17) et la théorie économique enseigne que les consommateurs sont efficacement informés par les prix lorsque ceux-ci sont égaux au coût marginal de production, y compris les coûts externes. Or, pour le carburant, celui-ci sera supérieur de 400 €/tep aux prix actuels. On suppose ici que le prix des autres formes d'énergie évoluera comme celui du carburant.

Pour les combustibles et carburants d'origine fossile d'une part et pour l'électricité d'autre part, la différence entre le prix et le coût sera maintenue par une taxe. Le prix ainsi établi permettra le développement du chauffage solaire et du chauffage au bois. On peut donc dire plus simplement que cette taxe sera créée pour obliger le marché à s'ouvrir aux formes d'énergie qui n'émettent pas de carbone. A noter que cette taxe peut être perçue aussi bien par le pays de production de l'énergie primaire que par le pays de consommation, ce qui donne un avantage aux pays producteurs d'électricité nucléaire.

La hausse des prix serait donc de 300 ou 400 €/tep, soit à peu près autant par mètre cube de fioul et 30 ou 40 centimes/litre de carburant ; si l'objectif doit être atteint dans trente ans, cela fait une hausse d'environ 1 centime d'euro par litre et par an - ce qui n'est pas beaucoup - ou encore 0,1 centime d'euro par kWh électrique et par an (18).

Si l'Etat décidait de limiter la croissance de la production nucléaire en favorisant

la production d'électricité au gaz ou charbon avec séquestration du gaz carbonique, le prix de revient marginal de l'électricité serait augmenté du coût de la séquestration. Selon les experts de l'MFP, celui-ci serait de 60 € par tonne de CO₂, soit environ 200 €/TC ce qui, compte tenu des rendements de production d'électricité, correspond à 250 ou 500 €/tep final produite à partir de gaz ou de charbon. Un couplage de ces centrales avec des éoliennes diminuerait le coût de la séquestration par TEP produite, ce qui pourrait atténuer les surcoûts dus à l'investissement.

Redisons que les possibilités de la séquestration, pour autant qu'elles soient prouvées, ne permettront aucunement d'augmenter les consommations de carburants contenant du carbone fossile.

Au-delà : si la demande en carburant « sans carbone » dépasse les possibilités totales de la biomasse, utilisera-t-on l'hydrogène ? Alors, selon les informations disponibles, avec les techniques actuelles le prix de l'énergie, y compris sa distribution, atteindra un nouveau pallier - de 600 ou 800 €/tep supérieur au prix actuel, voire plus, un niveau qui ouvre bien d'autres possibilités techniques.

La hausse des prix ne suffit pas

Si un véhicule utilisé en ville pour 12 000 km/an (60 km par jour) avec une consommation de 10 l/100km d'un carburant dont le prix est de 1,3 €/l (prix escompté dans notre scénario) est remplacé par un véhicule qui consomme 5 l/100 km, l'économie annuelle sera pour son utilisateur de 800 €, correspondant, si l'intérêt est à 4 % (en monnaie constante) et l'amortissement de 7 ans, à un investissement de 4 300€, somme insuffisante pour inciter à changer de véhicule mais propre à orienter le choix lorsque la décision de changer de véhicule a été prise.

Quant à la consommation d'énergie de chauffage, si une isolation permet de réduire de 10 % une consommation de

(17) Sauf le coût de l'encombrement en ville.

(18) Une autre façon de procéder serait de combiner taxe et facilités financières de façon à limiter la hausse du prix.

2 Tep par an, et si le prix est porté de 500 à 800 €/tep, l'économie annuelle est de 160 €, équivalente, avec un intérêt de 4 % en monnaie constante et un amortissement de 30 ans, à un investissement de 3000 €, ce qui ne justifie que des travaux d'isolation d'un montant inférieur, tels que le remplacement de simples vitrages par des doubles vitrages, lorsque ce n'est pas déjà fait.

Ce dernier exemple laisse penser que même une hausse des prix que l'on peut juger très forte ne suffirait pas à faire diminuer la consommation d'énergie comme dans ce scénario : la réglementation, le conseil, une incitation financière et une action auprès des maîtres d'ouvrage et des architectes seront tout aussi nécessaires.

D'un point de vue fiscal, il serait possible de limiter la hausse du prix de l'énergie en considérant le coût moyen, effets externes compris, mais cela rendrait la hausse de prix encore moins efficace pour orienter et contenir la demande.

D'un point de vue macro-économique, une étude reste à faire. Comme les impôts sur l'énergie viendront en déduction d'autres impôts, les effets d'un tel scénario, bien qu'ils soient spectaculaires sur certains secteurs d'activité, seront sans doute globalement minimes comme le montrent les études faites dans d'autres pays de l'Union européenne : en Hollande, Allemagne, Royaume-Uni, de l'ordre de 0,1 % de PIB chaque année ; la facture énergétique serait considérablement diminuée ce qui veut dire que la quasi-intégralité de la différence entre prix et coûts resterait au sein de l'économie nationale ; l'effet direct sur l'activité serait favorable : travaux en agriculture et syl-

viculture, nouveaux équipements de production de biocarburant, nouvelles centrales nucléaires, constructions nouvelles et isolations des bâtiments anciens etc.

Nous savons que ces réflexions assez intuitives peuvent être trompeuses : les taxes sur les hydrocarbures que nous payons aux pays producteurs leur permettent de nous acheter des Airbus, les nouveaux besoins priveront de main d'œuvre d'autres secteurs d'activité etc. Il faut pousser l'analyse. Disons seulement ici que le choc causé par cette nouvelle orientation touchera tous les secteurs de l'économie, ceux qui sont très techniques, et ceux qui ont besoin de main d'œuvre peu qualifiée. Cette diversité est de nature à procurer des emplois à toutes les catégories de population à une époque où les offres d'emploi, globalement, font défaut.

Les décisions les plus efficaces sont nationales

Il est donc possible avec les techniques actuelles de diviser par trois en trente ans les émissions de gaz à effet de serre liées à l'énergie en s'adressant à la consommation finale sans peser sur la compétitivité des entreprises. Pour y parvenir, il est remarquable que les décisions les plus efficaces sont nationales et ne demandent pas de coopération internationale.

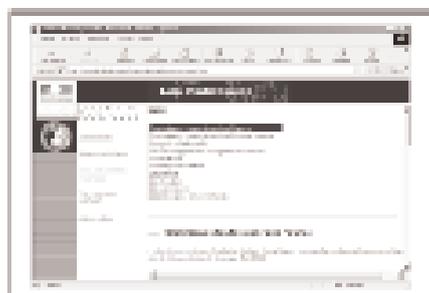
Parmi les mesures les plus décisives, toutes celles qui touchent à l'urbanisme relèvent de la décision des communes. Une façon de les associer serait d'établir une relation entre les mesures d'urbanisme et les émissions de gaz carbonique qu'elles permettent d'économiser,

et de traduire cela dans le calcul des dotations versées par l'Etat aux communes. Ce serait un moyen de faire porter la souci de l'effet de serre par les centaines de milliers d'élus locaux, un relais précieux vers l'ensemble des citoyens.

Les hypothèses et réflexions présentées dans cet article pourraient avec d'autres travaux être utiles à l'élaboration de la prochaine loi d'orientation sur l'énergie. En effet, certaines décisions dont l'effet est nécessairement lointain sont à prendre sans tarder car, malgré les incertitudes, elles vont sûrement dans le bon sens et pourront être ajustées selon les informations à venir. Ces décisions concernent notamment l'urbanisme, la construction de centrales nucléaires, la recherche technique sur les moteurs biénergie (carburant et électricité), le développement des réseaux de chaleur, la hausse progressive, modérée mais régulière de l'énergie délivrée aux consommateurs finaux, hausse qui sera comprise de la population si celle-ci est suffisamment consciente de l'ampleur des enjeux.

Car les enjeux de la lutte contre l'effet de serre sont à la fois économiques et stratégiques : contribuer à retarder une hausse du prix de l'énergie dont les pays pauvres souffriront beaucoup plus que les pays développés, introduire des éléments de paix dans un contexte mondial tourmenté et travaillé par le ressentiment du Sud vis-à-vis du Nord, montrer une voie de développement sobre en énergie et susciter, chez nous, une plus grande activité dans de nombreux secteurs de l'économie, en particulier l'agriculture et la sylviculture, les grands équipements technologiques et le bâtiment - un grand projet en somme. ●

L'Observatoire de l'Energie sur internet



STATISTIQUES ENERGETIQUES ETUDES PROSPECTIVE

www.industrie.gouv.fr/energie/statistiques-energie.htm

Statistiques, analyses commentées, abstracts...

- dépliants et fascicules statistiques
- bilan et facture énergétique
- conjoncture
- notes statistiques
- rapports
- conférences de politique énergétique
- séminaires européens et internationaux
- liens avec la statistique publique INSEE, AIE/OCDE...



BASE DE DONNEES PEG@SE

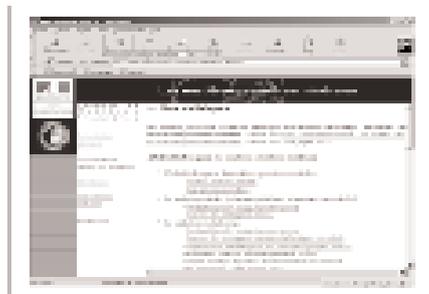
www.industrie.gouv.fr/energie/statistia/pegase.htm

ou par le biais du site énergie de l'OE :

www.industrie.gouv.fr/energie/statistiques-energie.htm

La base de données PEG@SE, c'est :

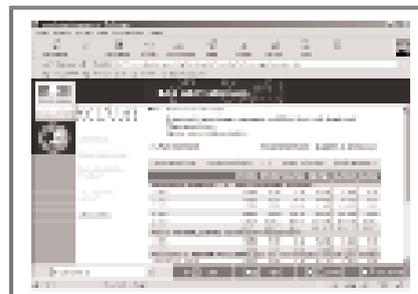
- un outil statistique ergonomique
- des fonctions volontairement basiques
- des séries longues mensuelles ou annuelles directement téléchargeables :



STATISTIQUES SUR LES MATIERES PREMIERES

www.industrie.gouv.fr/energie/statistiques-mp.htm

- l'industrie française des matières premières minérales
- les échanges de la France avec l'étranger



- prix pour les ménages, les entreprises et les collectivités
- bilans nationaux (importations, production, consommation...)
- facture énergétique de la France
- cours internationaux
- indicateurs macroéconomiques et climatiques

pegase est optimisée pour Internet Explorer mais fonctionne également avec Netscape.