

futuribles

analyse et prospective

Perspectives énergétiques
et effet de serre

Vers la fin du pétrole ?

Quelles alternatives énergétiques ?

La maîtrise de l'énergie
et le défi climatique

LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

Nous voici en 2006. Ceux qui sont nés au début des Trente Glorieuses, avec les ordonnances instituant un système général de protection sociale, qui ont vu s'instaurer les fondements d'une Europe enfin pacifiée et, en 1968, sont descendus dans la rue pour s'élever contre l'évangile de la croissance, vont fêter leur soixantième anniversaire.

Ceux-là qui, avec les premiers vols spatiaux, ont aussi découvert que nous ne formions qu'une « seule Terre » et étaient donc supposés devenir tous solidaires d'un même écosystème planétaire, qui ont suivi la première conférence mondiale sur l'environnement (Stockholm, 1972) et ont connu les chocs pétroliers, en dépit des « Trente Piteuses », n'ont rien changé (ou presque) à leurs habitudes. Ils vivent depuis 30 ans à crédit, au détriment des générations suivantes, accumulant les déficits tout en faisant assaut de beaux discours sur la gouvernance et le développement durable.

Heureux pays que cette vieille France, si riche qu'elle a pu jusqu'à présent vivre sur ses lauriers flétris, sans entreprendre aucune des réformes profondes qui s'imposaient pour des raisons tant intérieures qu'extérieures. Quant aux problèmes internes, je n'y reviendrai pas, hormis pour rappeler qu'à l'évidence toutes les conditions

sont désormais réunies pour que le système explose.

Intéressons-nous plutôt, cette fois, non à la France mais au monde, sous l'angle du développement durable sur lequel on disserte à plaisir sans vraiment avoir pris encore la juste mesure du défi. Ce défi concerne le fondement même d'un modèle de développement qui, malgré tout ce que l'on peut dire de la dématérialisation, de la tertiarisation, de l'économie de la connaissance, repose sur une exploitation outrancière des ressources de la planète, entraîne la production de pollutions et de nuisances qui en altèrent profondément l'équilibre, et risquent de susciter des perturbations d'une ampleur sans précédent.

Cette insoutenabilité de nos modèles de développement est illustrée aujourd'hui par les tensions sur les ressources énergétiques fossiles, à l'évidence insuffisantes pour permettre la généralisation à tous les peuples du mode de vie des pays industrialisés, et par la perturbation colossale qu'entraînerait du reste une telle généralisation vis-à-vis de l'écosystème et donc des conditions de vie sur Terre.

Dans mon éditorial d'octobre sur « la fin du pétrole ? », je rappelais une banalité, à savoir le caractère limité des ressources fossiles, en même

temps que l'explosion des consommations dans les pays industrialisés et ceux en voie de développement rapide. Les économistes, ayant une foi inébranlable en la vertu des prix, nous ont longtemps rétorqué que la demande croissant alors que la ressource est rare, les prix augmenteraient dans des proportions suffisantes pour nous permettre d'opérer les ajustements requis : en comprimant la demande et en finançant le développement de ressources alternatives. Ainsi a-t-on propagé dans les esprits l'idée que la magie des prix et celle de la technique permettraient de surmonter toutes les contraintes.

Force est toutefois aujourd'hui de se rendre à l'évidence. Deux facteurs limitants vont s'imposer dans les années qui viennent : la disponibilité en ressources énergétiques fossiles, particulièrement les hydrocarbures ; et le réchauffement climatique induit par les émissions de gaz à effet de serre.

S'agissant des ressources en hydrocarbures, les géologues nous ont depuis longtemps alertés sur le fait qu'elles étaient limitées. En revanche, deux éléments nouveaux caractérisent la période actuelle : d'une part la forte croissance de la demande, en raison d'abord des pays industrialisés outrageusement consommateurs tels les États-Unis ; ensuite la croissance économique rapide des pays en développement. Un certain nombre de responsables de compagnies pétrolières reconnaissent eux-mêmes que nous allons vers un « pic de production » à l'horizon des toutes prochaines décennies, ceci expliquant l'envolée depuis début 2000 du prix du pétrole — aucunement comparable, cependant, à celle que nous avons connue lors des chocs des années 1970.

Simultanément, et là est le deuxième terme de l'équation, sont enfin reconnus aujourd'hui l'enjeu considérable résultant du changement climatique et la nécessité de limiter les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 à la moitié de celles de 2000, tout cela durant une période où la population de la planète augmentera environ de moitié. En termes plus précis, cela signifie qu'il faudra diviser en moyenne par quatre les émissions de dioxyde de carbone dans les pays industrialisés, objectif auquel sont hélas loin de souscrire tous les pays concernés.

Jamais donc nous n'avons été confrontés à un tel défi en matière et d'approvisionnement énergétique et de développement durable. Celui-ci était aisément prévisible. Il a fait l'objet de très nombreux articles publiés dans la revue *Futuribles* depuis sa création (1975). Mais force est de constater, là encore, que les mesures qui s'imposaient n'ont point été adoptées.

Quels espoirs pouvons-nous aujourd'hui fonder — sous réserve de quels investissements et à quel horizon — sur les différentes sources alternatives d'énergie ? Que pouvons-nous attendre de l'énergie nucléaire, des énergies renouvelables, des efforts pouvant être faits au titre d'une plus grande efficacité énergétique, donc d'une croissance plus sobre ? Telle est la problématique générale de ce numéro spécial qui montre bien que, à défaut d'une solution miracle intervenant en temps voulu, il nous faudra simultanément améliorer considérablement nos politiques de maîtrise énergétique et diversifier les sources d'approvisionnement.

Hugues de Jouvenel

Pierre Radanne ¹

Accepter le nouveau siècle

Cet article de Pierre Radanne résume, en quelques pages, l'essentiel des défis posés par le troisième choc énergétique qui affecte le monde depuis un peu plus d'un an. Après une brève description du caractère cyclique de l'énergie, Pierre Radanne montre comment s'est développé ce troisième choc et souligne combien les défis du changement climatique le placent à un niveau très différent des précédents chocs énergétiques connus.

Dans un tel contexte, le problème posé est d'ampleur civilisationnelle : on ne pourra généraliser le mode de vie occidental à toute la planète ; c'est pourquoi les pays développés doivent impérativement ouvrir la voie à de nouveaux comportements maîtrisant la consommation énergétique. Les pouvoirs publics, en Europe en particulier, doivent selon lui hiérarchiser leurs priorités et mettre en place une stratégie de long terme, passant par une certaine « re-régulation » du secteur de l'énergie. Il faut, conclut Pierre Radanne, se donner les moyens de réussir ce nouveau siècle, en utilisant le secteur de l'énergie comme vecteur de règlement des problèmes climatiques et voie d'émergence d'une nouvelle forme de civilisation, à l'échelle planétaire.

S.D.

1. Ancien président de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), auteur notamment du rapport de la Mission interministérielle sur l'effet de serre (MIES), *La Division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050* (Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004) et de *Énergies de ton siècle ! Des crises à la mutation* (Paris : éd. Lignes de repères, 2005).

L'énergie, un secteur cyclique

Depuis 20 ans, l'énergie était sortie de l'actualité. Après les chocs pétroliers de 1973 et 1979, tout semblait rentré dans l'ordre. Les investissements d'extraction de pétrole, de substitution et d'économie d'énergie avaient rendu l'énergie abondante et peu chère. Le spectre de la pénurie avait disparu.

Simultanément, le développement du nucléaire a fasciné. La production d'un kWh à partir d'une si petite quantité d'uranium a nourri l'impression d'un potentiel quasi infini. Mais trois limites sont apparues. Il a fallu reconnaître que malgré la qualité des personnels et la redondance des systèmes de sécurité, le risque d'accident majeur ne pouvait être écarté et que les effets de la radioactivité, d'une portée temporelle inédite, posaient des défis quant à la pérennité de la prise en charge des déchets et des sites à décontaminer. En outre, les progrès technologiques rendent de plus en plus facile l'accès à l'arme atomique et accentuent le risque de prolifération nucléaire. Et voilà le développement du nucléaire contesté et enlisé.

Progressivement, la conjoncture s'est inversée. Depuis début 2000, le prix du pétrole a été multiplié par trois. Ce qui est préoccupant, c'est que ce troisième choc pétrolier dans lequel nous sommes entrés ne résulte de nul événement imprévu. La consommation est tirée par la demande des pays émergents comme la Chine et l'Inde, à la croissance économique vive et régulière. Il s'agit d'un choc « froid » (dans la mesure où aucun événement extérieur ne l'a

engendré) qui contraste avec les chocs « chauds » de 1973 et 1979, provoqués par des guerres au Moyen-Orient. S'ils se sont succédé sans qu'il y ait réellement de déséquilibre entre offre et demande, ils ont pourtant donné lieu à des impulsions fortes de politique énergétique de la part des États. À l'époque, beaucoup ont eu le sentiment que l'on entrerait irrémédiablement dans une période chère pour les hydrocarbures.

En fait, les délais de réponse à un choc pétrolier résultent des contraintes techniques : mettre en place une centrale nucléaire, un oléoduc ou un port méthanier prend 10 ans. Nous ne savons rien faire en matière énergétique en moins de cinq ans. En 15 ans, tout est possible : la construction d'installations lourdes et même la mise en place de filières nouvelles. Ainsi, cette période des chocs pétroliers dura 12 ans et 3 mois, dans les pays concernés, d'octobre 1973 à décembre 1985, date à laquelle les investissements réalisés ont porté leurs fruits.

Après cette date, la situation a été complètement différente : on s'est retrouvé en situation de surproduction, y compris électrique. On en a conclu encore une fois, péremptoirement, que cette situation durerait. Ce contre-choc pétrolier a donné l'impression d'une abondance d'énergie retrouvée, avec un prix du pétrole revenu à son niveau de 1972. Ce mouvement a encore été amplifié par l'effondrement de l'appareil industriel vétuste des anciens pays communistes à partir de 1989 et donc de leur consommation d'énergie. L'énergie a semblé perdre de son caractère stratégique et est redevenue une matière première comme une autre.

Mais cette conjoncture s'est encore une fois inversée et le prix du pétrole a retrouvé, en 2004, un niveau de prix comparable à ceux des chocs pétroliers. Et l'on se demande si cette nouvelle situation va être pérenne. Mais ce choc pétrolier est d'une nature différente des précédents. D'abord, les pays industrialisés et ceux qui entrent dans un processus d'industrialisation représentent désormais quatre milliards d'habitants, avec la Chine et l'Inde, contre seulement un milliard auparavant. Le rythme de la hausse de la consommation pétrolière atteint ainsi 2 % à 3 % par an. Ce qui est étonnant, c'est que ce choc pétrolier froid ne provoque aucune réponse sérieuse des États. Pourtant, si l'on agit, les prix baisseront, même s'ils diminueront moins qu'auparavant.

Dans le courant du siècle se posera aussi inévitablement un vrai problème d'approvisionnement en hydrocarbures. Le débat sur le *peak oil* s'engage enfin, c'est-à-dire sur la date à partir de laquelle la production pétrolière déclinera irrémédiablement, les nouveaux gisements mis en exploitation ne parvenant plus à compenser le tarissement des gisements anciens. Depuis 25 ans déjà, les découvertes annuelles de pétrole sont inférieures à la consommation pétrolière. Dans une à trois décennies (les experts hésitent), il faudra constater un épuisement progressif des gisements les plus accessibles, donc les moins chers. Le prix de 60 dollars US par baril pourrait être la moyenne observée au cours du siècle. Mais on peut penser que le *peak oil* pourra être repoussé jusqu'en 2025

environ. Certains ont un avis beaucoup plus pessimiste mais sous-estiment les capacités de réaction des sociétés pour économiser l'énergie.

Un autre facteur accentue les tensions : les investissements massifs réalisés en réponse aux chocs pétroliers vont bientôt arriver en fin de vie et impliquer des besoins importants de capitaux, donc des niveaux de prix qui facilitent la reconstitution des marges pour les engager. En outre, l'épuisement progressif de gisements de pétrole hors OPEP² (États-Unis, mer du Nord) accroît la dépendance vis-à-vis d'un Moyen-Orient politiquement de plus en plus instable. En même temps, les tensions internationales brident fortement le développement du nucléaire civil par crainte de prolifération incontrôlée. Traduction du choc pétrolier, ce secteur est de nouveau dominé par des cartels avec les grandes compagnies et les États pétroliers, la main dans la main pour tirer leur rémunération à la hausse.

On ne doit toutefois pas tirer des limites rencontrées dans la valorisation des combustibles fossiles et dans le développement du nucléaire des conclusions philosophiques absolues, et il faut se garder de tout malthusianisme qui s'alimenterait de la peur de l'avenir. Il faut seulement prendre conscience que le rêve d'une corne d'abondance énergétique illimitée est illusoire. Toutes les ressources sont limitées, présentent des difficultés d'utilisation, des impacts sociaux et environnementaux négatifs, et bien sûr ont un coût. Ces limites varient selon les contextes

2. Organisation des pays exportateurs de pétrole.

historiques. La technologie et la culture les déplacent. On le voit, le secteur de l'énergie est marqué par des cycles de grande amplitude.

L'absence de réponse par les États au nouveau choc pétrolier est très inquiétante. Leur préoccupation unique est, semble-t-il, de protéger leurs ressources fiscales, ce qui est un peu mince. Il faut en rechercher la cause dans la vague de libéralisation qui a suivi la baisse du prix du pétrole de 1986. L'engagement d'investissements publics massifs consentis pour répondre aux chocs pétroliers avait alimenté une demande d'ouverture et surtout de privatisation des marchés. Les dépenses les plus lourdes étant faites, les espoirs de rentabilité à court terme de nouveaux acteurs ont primé par rapport aux préoccupations de service public et de stratégie de long terme des opérateurs publics nationaux historiques. Cette mutation a été d'autant plus marquée que seuls les opérateurs privés, habitués à franchir les frontières, ont pris en charge le passage d'un marché national étroit à celui d'un vaste espace européen. Mais ce ne sera qu'en 2007, avec l'ouverture à la concurrence de la totalité du marché de l'électricité, que ce recul de la régulation publique sera achevé. Là encore, il aura fallu près de 20 ans.

Le défi du changement climatique

Voilà pour les cycles récents. La lutte contre le changement climatique vient profondément modifier la donne en exigeant une refonte profonde des modes de production et de consommation d'énergie, et donc

des politiques publiques fortes nécessitant des investissements massifs. Cette lutte va imposer une division en moyenne par quatre des émissions de dioxyde de carbone des pays industrialisés par rapport à laquelle les exigences du protocole de Kyoto apparaissent déjà bien timides.

On encourt, si l'on ne fait rien, un bouleversement du climat d'ici la fin du siècle équivalent à la sortie de l'ère glaciaire, avec une hausse de l'ordre de 5°C. L'humanité va devoir limiter ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2050 à la moitié de celles de 2000, tout en augmentant sa population de moitié. Simultanément, les pays en développement ne peuvent réussir à limiter les leurs par des progrès technologiques ou des évolutions de modes de vie, sans que les pays industrialisés aient défriché le terrain. Il s'agit là — aucun doute n'est permis — d'une condition de la paix dans ce siècle. Et maintenant, les négociations pour l'après-Kyoto, au-delà de 2012, ont débuté, avec une question fondamentale : quel climat souhaitons-nous sur Terre ?

Ce nouveau siècle se présente donc sous un jour beaucoup moins clair que les deux précédents. À l'amorce des XIX^e et XX^e siècles, les disponibilités en combustibles fossiles et les progrès scientifiques rapides ouvraient la perspective d'une amélioration fantastique des conditions de vie. Le XXI^e siècle devra reprendre le défi d'assurer le développement d'une population mondiale de neuf milliards d'habitants, dans des conditions d'équité qui permettent de réduire les tensions. Mais les perspectives aujourd'hui décrivent toutes la même impasse : les

ressources énergétiques fossiles à mobiliser sont à la fois insuffisantes pour permettre la généralisation à tous les peuples du standard de vie des pays industrialisés, et en même temps si massives qu'elles déclencheraient une perturbation de l'environnement telle qu'elle dégraderait les conditions mêmes de vie sur Terre.

Partant de ce constat, réfléchir à un projet énergétique pour ce siècle, de portée planétaire, revient à mettre la maîtrise de l'énergie au centre du débat. Si l'on regarde avec recul les deux siècles écoulés, l'accroissement quantitatif général des consommations d'énergie a masqué un progrès inouï de la productivité de l'utilisation de l'énergie. L'amélioration des rendements a été générale sur toute la chaîne qui va de l'extraction à la transformation et à l'utilisation de l'énergie. C'est ce mouvement qu'il faut prolonger et intensifier.

La hiérarchisation des priorités

Une stratégie énergétique de long terme doit être décomposée en deux parties. Un consensus devrait être trouvé pour engager toutes les politiques qui desserrent les contraintes pesant sur l'approvisionnement énergétique, qu'elles découlent de la dépendance extérieure, des impacts environnementaux ou des risques technologiques. Ces priorités, ce sont les progrès d'efficacité énergétique, la valorisation des ressources renouvelables, une réorientation profonde des priorités dans les transports, ainsi que la généralisation de comportements d'usage plus sobres. Toutes ces politiques ont en commun de réduire la fragilité du système.

Bien évidemment, ces politiques d'intérêt commun ne suffiront pas à boucler le bilan énergétique. Il faudra encore longtemps arbitrer entre l'utilisation des combustibles fossiles et du nucléaire. Chaque énergie a ses atouts et ses inconvénients, difficilement comparables. On doit se préparer, dans les décennies à venir, à des révisions régulières de leur classement en termes de risque, d'acceptabilité sociale et de coût.

Le gaz tient actuellement la corde. Ses parts de marché grimpent, tant dans les applications industrielles, les usages de chauffage et la production électrique. Mais cet engouement induira des tensions sur l'approvisionnement. Le charbon est très décrié aujourd'hui, à cause de son mauvais bilan environnemental (émissions de soufre, de dioxyde de carbone), mais il reste la ressource la plus abondante, donc celle dont le prix restera le plus bas. La réduction de la consommation de pétrole va, de son côté, devenir plus difficile à mesure que l'on s'attaquera aux usages où il est prédominant (transport, pétrochimie). Le développement du nucléaire reste conditionné à sa capacité à éviter tout accident majeur et à trouver un accord collectif sur la gestion des déchets. Au-delà de l'opposition de principe entre pronucléaires et antinucléaires, le nucléaire doit être compris comme une stratégie de second choix puisqu'il ne fait que substituer un risque à un autre. Et la donnée nouvelle est l'émergence, depuis le 11 septembre 2001, d'un fanatisme désespéré qui interdit toute prolifération des matières nucléaires.

Les enjeux vont aussi exiger l'émergence — enfin ! — d'une poli-

tique énergétique européenne coordonnée. Comme les politiques nationales restent fortement contrastées (recours au nucléaire, rôle des collectivités locales, place de la cogénération), le seul axe d'accord possible est de convenir d'abord du premier niveau de choix : efficacité énergétique, valorisation des renouvelables, réorientation des transports et sobriété des comportements.

La nécessaire re-régulation du secteur de l'énergie

Le mouvement de libéralisation a aggravé la crise de gouvernance du secteur énergétique, en particulier en France. Les gouvernements se sont désengagés de l'énergie, justifiant cela par la libéralisation, alors qu'ils le font parce qu'avant tout confrontés à une grave crise des finances publiques. Leur gestion est totalement dominée par une réduction de la pression fiscale sur les entreprises et le travail, compte tenu de la concurrence accrue causée par la mondialisation de l'économie, tandis qu'un fort chômage endémique et une croissance économique faible aggravent le poids des budgets sociaux. L'État a de fait renoncé à agir dans le secteur énergétique par la dépense publique, en réduisant la voilure de son effort de recherche et de son soutien à la maîtrise de l'énergie, en même temps qu'il proclame ne pas vouloir utiliser davantage l'outil fiscal.

Par ailleurs, la suppression des monopoles publics réduit ses capacités de pilotage des tarifs de l'énergie et d'intervention en matière de politique industrielle. Cette crise de l'intervention publique est commune

à tous les pays. Les expériences d'ouverture du marché pratiquées sous différentes latitudes montrent les limites des marchés libéralisés. La baisse des prix liée à davantage de concurrence fut plus que compensée par le remplacement de l'actionnaire public par des actionnaires privés, plus gourmands en rémunération du capital. L'instabilité de l'actionnariat des compagnies impose des critères de gestion de court terme. La faiblesse des investissements engagés risque de fragiliser le secteur (difficulté à assurer les pointes de consommation électrique, vieillissement progressif de l'appareil de production, vulnérabilité des réseaux de transport d'énergie), et probablement de dégrader sa capacité d'adaptation à des changements brusques de contexte (approvisionnement énergétique, prix, risques technologiques). Le secteur privé ne peut pas non plus assurer l'accès de tous à l'énergie et l'extension des réseaux dans les pays en développement.

Ces difficultés ne sauraient pourtant pas remettre en cause le dépassement irrémédiable des monopoles nationaux et la nécessité d'en appeler aux capitaux privés pour relayer le désengagement de la puissance publique. Mais ces insuffisances du secteur privé, comme celles des États, rendent indispensable un progrès considérable dans la gouvernance du secteur de l'énergie, à travers une mise à jour des missions de service public et un renforcement de la régulation.

Le premier lieu où ces questions ont été clairement mises sur la table a été, finalement, le protocole de Kyoto. La stabilisation du climat par l'ensemble de la communauté hu-

maine implique en effet de fixer à chaque pays des obligations de réduction des émissions des gaz qui provoquent le changement climatique. Cette régulation, devant couvrir les acteurs publics et privés, a posé la question majeure des instruments d'intervention. Les tenants d'une intervention publique forte ont vite buté sur l'impossibilité de dégager un accord international sur l'harmonisation des fiscalités, et des efforts publics d'investissement et d'aide au développement. Les tenants d'un marché ouvert ont dû concéder que les quotas d'émission fixés pour les États devaient redescendre en cascade vers les acteurs économiques.

De ce débat a émergé une nouvelle catégorie d'instruments : les quotas échangeables. Ces instruments allient la puissance de l'autorité régaliennne par la fixation de quotas impératifs vis-à-vis des acteurs privés ou publics, sous peine d'amende, avec la souplesse du marché en permettant des transactions entre ceux qui dépassent leurs quotas et ceux qui ne parviennent pas à les respecter. Et tout cela se réalise après fixation d'objectifs par l'État par décret, directement sur le marché, sans passage par les finances publiques. Le problème lancinant auquel la maîtrise de l'énergie était confrontée depuis 30 ans — à savoir comment déclencher des investissements massifs par une myriade d'acteurs dans une capacité budgétaire publique inévitablement limitée — trouverait ainsi une issue positive. L'État peut en effet, à partir d'exercices de prospective débattus, répartir les objectifs à atteindre par énergies et catégories d'acteurs, élaborer une programmation de moyen

et long termes, et articuler pour y parvenir différents instruments de politique publique : la réglementation, l'investissement public dans des secteurs clefs (la recherche, les transports collectifs, l'émergence de filières nouvelles), la fiscalité et le marché de quotas échangeables. Toutefois, cette nouvelle génération d'instruments va demander près d'une décennie pour être maîtrisée.

Comportements et modes de développement

Cette qualité de la régulation est probablement un préalable à une évolution massive des comportements. La transparence croissante de la société renforce l'exigence d'équité dans la répartition des efforts. Si chacun reconnaît que les comportements doivent être améliorés (choix d'achat, économie d'énergie, préférence pour les énergies renouvelables, comportements de conduite...), c'est aussitôt pour souligner que son passage à l'acte doit être soutenu par celui des autres, à commencer par les collectivités publiques et les entreprises. En clair : « Je fais si tu fais, si nous faisons tous. »

Maintenant, l'acteur déterminant est devenu le consommateur dont la qualité des décisions d'achat et des comportements d'usage détermine le niveau de l'approvisionnement en énergie. Les opérateurs énergétiques sont quant à eux confrontés à une difficile optimisation entre des sources d'approvisionnement aux contraintes, risques et pollutions multiformes, et donc à une tendance du corps social au rejet des nouveaux équipements. L'énergie

était, depuis la Libération, avant tout l'affaire de l'État, en France, elle est maintenant celle de la société tout entière.

Cette question majeure d'une culture collective en matière de maîtrise de l'énergie se pose aussi à l'échelle internationale. Le fossé entre les États-Unis et l'Europe ne cesse de s'élargir. Pour des niveaux de vie assez comparables, un Français consomme deux fois et demie moins d'énergie qu'un Américain, et émet trois fois moins de gaz à effet de serre. Explication : des deux côtés de l'Atlantique, l'histoire récente de l'énergie a été vécue complètement différemment.

L'Europe, de plus en plus dépourvue de combustibles fossiles a été fortement frappée par les chocs pétroliers des années 1970. Pour y faire face, elle s'est petit à petit engagée vers une utilisation plus efficace de l'énergie et, plus récemment, dans le développement des énergies renouvelables. Par tradition, elle a maintenu un niveau élevé de services publics, notamment dans le domaine des transports. Quand la question climatique a émergé, les Européens ont pu reconnaître cette contrainte nouvelle car elle était du même type que celle à laquelle ils avaient été confrontés 20 ans plus tôt. D'où un engagement dans le protocole de Kyoto.

L'évolution américaine fut tout autre. Les États-Unis, riches en énergies, n'ont pas été frappés aussi fortement par les chocs pétroliers. La faible densité de population y induit des comportements énergétiques dispendieux (taille des logements, distances à parcourir). Le style de vie

américain est indissociablement lié à une consommation croissante d'énergie. Dès lors, la fixation d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre, lors du protocole de Kyoto, a constitué pour ce pays la première limitation historique de ce type à laquelle il ait eu à faire face. En conséquence, les pays en développement ont bien devant eux deux modèles de développement qui divergent. Ils perçoivent de plus en plus clairement que le mode de vie américain n'est pas généralisable à toute la planète, en termes à la fois de disponibilité en ressources et de capacité d'absorption par l'environnement.

Réussir ce siècle

Ce siècle a mal commencé. Pour une raison simple : nous n'en avons rien espéré. Collectivement. J'ai toujours cru que le passage de l'an 2000 serait une grande fête, mais aussi un feu d'artifice d'idées, de projections d'images de l'avenir, d'espoirs de convergence des peuples du monde, une mobilisation collective pour que ce siècle soit moins destructeur que le précédent. Il n'y a rien eu de tout cela. On a bien fait sauter les bouillons, mais chacun dans sa bulle de relations affectives et amicales. Cette absence d'investissement dans l'avenir est générale : elle touche les pays industrialisés comme les pays en développement.

S'engage en fait, devant nous, une mutation considérable de civilisation. Celle que nous connaissons, valorisant une consommation toujours croissante de biens matériels, va dans le mur. Il n'y a pas les ressources en énergie pour son extension à toute la planète et les dégâts

qu'elle provoque deviennent insupportables. Il en résulte une question philosophique fondamentale : le fait que nous retournions dans un monde fini (au plan des ressources exploitables et des pollutions supportables), signifie-t-il la fin du développement ? Est-ce la fin de l'histoire avec comme seul horizon, une éternelle stagnation ? La tentation est alors forte de se replier dans une vision noire de l'avenir.

Mais une autre civilisation va émerger. Le cahier des charges en est connu : faire la paix avec la planète et avec tous les humains. Cela devra passer par un usage économe et sobre de l'énergie, une équité d'accès au développement entre les peuples, un pilotage collectif du climat mondial. Il faut donc s'interroger sur les directions que la prochaine civilisation va prendre. En fait, une voie formidable s'ouvre devant nous avec le développement des nouvelles technologies de la communication. Elles portent en elles la perspective de ce que l'on pourrait appeler une société relationnelle. Ce

qui importe, ce ne sont pas ses moyens techniques, mais c'est son objectif : orienter nos vies vers un épanouissement considérable au plan de l'accès aux autres, des échanges entre les personnes, au plan culturel. Avec les progrès de l'Internet et de la téléphonie, les possibilités de relations interpersonnelles d'accès aux cultures des autres peuples et aux connaissances explosent.

Ainsi, il y a un champ infini d'exploration et d'enrichissement qui s'ouvre à chacun d'entre nous, et ce dans un monde fini dans l'utilisation des ressources. L'histoire n'est pas écrite. Mais c'est en imaginant l'avenir qu'on le construit. Le secteur de l'énergie a une double responsabilité : résoudre les défis décrits plus haut et permettre l'émergence de cette nouvelle forme de civilisation. Finalement, ce qui place la maîtrise de l'énergie au centre des choix énergétiques, c'est la modestie qu'imposent les enjeux vertigineux de ce siècle. Elle est indéniablement source de flexibilité et de liberté.

QUELQUES ARTICLES SUR L'ÉNERGIE PARUS DANS *FUTURIBLES*

APPERT Olivier, CUSSAGUET Pierre-Marie. « Prix du pétrole. Après les chocs, le retour à la norme ? » N° 189, juillet-août 1994, pp. 61-68

BONDUELLE Antoine, RADANNE Pierre. « Nucléaire, effet de serre. Quelle marge de liberté pour la France ? » N° 189, juillet-août 1994, pp. 97-120

BONNAURE Pierre. « Une politique énergétique pour la France. À propos du rapport *Énergie 2010-2020* ». N° 241, avril 1999, pp. 33-46

BONNAURE Pierre. « Le défi énergétique en France. À propos du *Livre blanc sur les énergies* ». N° 302, novembre 2004, pp. 57-68

BONNAURE Pierre, LAMBLIN Véronique. « L'automobile de demain. Quels enjeux, quelles perspectives ? » N° 311, septembre 2005, pp. 25-38

CHARTIER Philippe. « La biomasse : des chocs pétroliers à l'effet de serre ». N° 158, octobre 1991, pp. 37-61

CHEVALIER Jean-Marie. « Politique énergétique : les enjeux. La France peut-elle encore définir une politique énergétique nationale ? » N° 284, mars 2003, pp. 5-22

CHOPPLET Marc, THOMAS Daniel. « Vers des alternatives végétales. L'émergence d'une nouvelle bioéconomie ». N° 295, mars 2004, pp. 5-18

COMOLET Arnaud. « Le réchauffement global de la planète. Ses effets sur les activités humaines et les équilibres écologiques ». N° 118, février 1988, pp. 3-18

CRIQUI Patrick. « Le prix du pétrole : passé, présent et futur ». N° 189, juillet-août 1994, pp. 47-59

CRIQUI Patrick, MIMA Silvana, VIGUIER Laurent. « Les permis d'émission négociables. Enjeux et perspectives dans le cadre de la négociation sur le climat ». N° 255, juillet-août 2000, pp. 25-48

DESSUS Benjamin. « Énergie et développement durable ». N° hors série « L'an 2000, et après... », janvier 1999, pp. 52-60

DESSUS Benjamin. « Pas de panique en 2100. Assurer les besoins énergétiques de 11 milliards d'hommes sans détruire la planète ». N° 189, juillet-août 1994, pp. 69-95

GIRAUD Pierre-Noël, NADAI Alain. « L'impact économique de l'écotaxe. Les effets de la taxe carbone-énergie sur l'industrie française ». N° 189, juillet-août 1994, pp. 135-153

GUILLEMIN Claude. « Les déchets radioactifs, pyramides des temps modernes ! Prévoir à l'horizon de 200 000 ans ». N° 177, juin 1993, pp. 25-33

HOURCADE Jean-Charles, MÉGIE Gérard, THEYS Jacques. « Politiques énergétiques et risques climatiques. Comment gérer l'incertitude ? » N° 135, septembre 1989, pp. 35-60

MARTIN Jean-Marie. « Les perspectives énergétiques mondiales ». N° 189, juillet-août 1994, pp. 29-46

MAUGARD Alain, VISIER Jean-Christophe, QUÉNARD Daniel. « Le bâtiment à énergie positive ». N° 304, janvier 2005, pp. 39-55

VARET Jacques. « Les matières premières minérales. Flambée spéculative ou pénurie durable ? » N° 308, mai 2005, pp. 5-33

VARET Jacques. « Changements climatiques : le point sur la négociation ». N° 276, juin 2002, pp. 21-48

*Pour plus d'informations, consulter l'index de la revue, en ligne sur le site Internet de *Futuribles* : www.futuribles.com, ou nous contacter au 33 (0)1 53 63 37 71*

Jean Laherrère ¹

La fin du pétrole bon marché

**POURQUOI LES INFORMATIONS
SUR LES RÉSERVES SONT SI PEU FIABLES
ET CONTROVERSÉES**

Le pétrole est indispensable au fonctionnement de l'économie mondiale, notamment du fait de la dépendance quasi totale du secteur des transports. Pourtant, les prévisions d'offre et de demande d'hydrocarbures sont très différentes selon la source d'expertise considérée.

Ainsi, bien qu'elles soient peu débattues dans les publications institutionnelles, des controverses majeures pèsent sur l'estimation des réserves ultimes de pétrole. Les plus optimistes, arguant du fait que le montant des réserves prouvées n'a cessé de croître au cours des 50 dernières années, notamment grâce au progrès technologique et à l'exploitation de nouveaux champs en eaux profondes, prolongent la tendance passée et estiment que l'on n'a pas à craindre de pénurie avant 40, voire 80 ans.

De leur côté, les plus pessimistes affirment que le pétrole est une ressource finie dont les principales zones d'exploitation ont d'ores et déjà été découvertes. La consommation excédant désormais les découvertes et le progrès technique ayant ses limites, ils estiment, à partir de l'étude des découvertes passées, que la production pétrolière conventionnelle et non conventionnelle pourra croître jusqu'en 2015-2030 à un maximum de production de 90 millions de barils par jour, mais qu'elle déclinera ensuite inexorablement.

Jean Laherrère, spécialiste de l'étude des réserves, fait le point sur l'état et les prévisions d'évolution des réserves de pétrole mondiales.

1. Géologue-géophysicien, ancien directeur des techniques d'exploration chez Total et ancien président de la commission Exploration du Comité des techniciens de l'Union française des industries pétrolières, membre de nombreux groupes de travail sur les réserves d'hydrocarbures et membre de l'ASPO (Association for the Study of the Peak Oil&Gas).

Plutôt pessimiste dans son approche, il souligne à quel point la publication des chiffres, en ce domaine, est politique et sujette à caution, faute notamment de définitions communes de ce que l'on évalue. Il présente les diverses estimations des réserves ultimes d'hydrocarbures (c'est-à-dire la production cumulée + les réserves restantes à produire + ce qui reste à découvrir), et les divers facteurs influençant les prévisions. Sa conclusion est sans ambages : il faut rapidement maîtriser la consommation de pétrole (si besoin en augmentant sensiblement les prix) pour espérer satisfaire nos besoins futurs en énergie.

S.D.

Publier des données est un acte politique, car il dépend de l'image que l'auteur veut donner : riche devant l'actionnaire ou pauvre devant le fisc. L'auteur joue d'abord sur la fourchette d'incertitude pour choisir la valeur qui lui convient pour les réserves d'hydrocarbures, ensuite sur l'ambiguïté des définitions des termes.

Toutes les données publiées par les États, concernant les hydrocarbures, sont politiques. Les données techniques sont confidentielles sauf pour quelques pays comme le Royaume-Uni — rapports du DTI (Department of Trade and Industry) —, la Norvège — rapports du NPD (Norwegian Petroleum Directorate) — et les États-Unis à l'échelle fédérale — rapports des MMS (Mineral Management Services) sur le golfe du Mexique. Des compagnies d'espionnage industriel (IHS Energy et Wood Mackenzie) rassemblent les données techniques, mais l'achat de ces données représente des sommes considérables ; les organismes officiels ne les ont pas et doivent se contenter des données politiques. De plus, utiliser d'autres données que celles « officielles » peut attirer des réprobations véhémentes de la part des pays concernés. Ceci s'est produit avec BP (British Petroleum) et sa *Statistical Review of World Energy*, dans les années 1980, avec les Émirats arabes unis, et aucun organisme ou compagnie ne veut s'attirer les foudres des pays producteurs.

Concernant les ressources, on évoque fréquemment le débat entre optimistes et pessimistes ; on devrait plutôt parler du débat entre ceux qui ont les données techniques et ceux qui n'ont que les données politiques. On peut aussi discuter de ceux qui « crient au loup » (déplétion des ressources) et ceux qui « croient au Père Noël » (technologie et croissance éternelles).

Tony Blair disait en janvier 2000 (au sommet de Davos) que l'information était plus importante que le pétrole. En septembre 2005, il y a eu, au Royaume-Uni, une ruée d'automobilistes dans les stations-service, par crainte d'une pénurie : ceux-ci pensent que le pétrole est ce qu'il y a de plus important, quoique l'information sur la station ayant encore de l'essence soit aussi importante !

Le Premier ministre français, Dominique de Villepin, déclarait le 16 août 2005 : « Premièrement, le pétrole est une ressource épuisable, qui va se faire de plus en plus rare ; les réserves connues aujourd’hui sont équivalentes aux besoins de consommation tels qu’estimés d’ici 2030. Mais la raréfaction progressive des ressources face à une demande croissante se fera sentir bien avant cette date. »

Sa conférence de presse du 1^{er} septembre 2005 est ainsi relatée dans le quotidien *Les Échos* du 2 septembre 2005. : « Pour M. de Villepin, il est en effet temps de “voir la réalité en face” : “Nous sommes entrés dans l’ère de l’après-pétrole”. » Mais on pouvait lire dans *Les Échos* du 7 juin 2005 : « La technologie promet un siècle de pétrole. La pénurie d’hydrocarbures n’est pas pour demain. C’est en tout cas la thèse de l’Institut français du pétrole (IFP) qui a présenté, il y a quelques jours, sa vision optimiste des réserves de carburants fossiles. »

Dans son *World Energy Outlook 2004* (octobre), l’Agence internationale de l’énergie (AIE, Paris) annonçait que les ressources énergétiques de la Terre sont plus qu’adéquates pour satisfaire la demande jusqu’en 2030 et au-delà, ajoutant cependant qu’elle n’était pas certaine du coût de l’extraction et de la distribution aux consommateurs. Mais en avril 2005, l’AIE publiait un rapport *Saving Oil in a Hurry*, recommandant des plans de rationnement d’essence.

Il y a donc des avis officiels très contradictoires. Cela provient d’abord d’une mauvaise définition des termes, de l’incertitude et de la manipulation des données, et enfin de la motivation des auteurs.

Tout gouvernement, comme toute compagnie, est jugé sur son taux de croissance (produit intérieur brut ou valeur de l’action). Dans une société de consommation où consommer est devenu une vertu et économiser un vice, la croissance est le remède (ou le Père Noël) à tout problème futur (chômage, retraite, sécurité sociale). Il n’est donc pas question de parler d’arrêt de la croissance et encore moins de déclin. Le déclin est devenu un terme politiquement incorrect.

Définitions ambiguës et données peu fiables

Les mots tels que : énergie, équivalence, pétrole, réserves, ressources, conventionnel, lourd, léger, raisonnable, durable, soutenable, dangereux, sont mal ou pas définis, afin de permettre toutes les ambiguïtés.

La production de pétrole peut être annoncée comme allant de 66 Mb/j (le pétrole *regular* de Colin Campbell ²) à 83 Mb/j (soit tous les liquides selon

2. Colin Campbell, géophysicien, est membre fondateur de l’ASPO (NDLR).

l'USDOE [United States Department of Energy / département américain de l'Énergie]) en 2004 ! Il y a consensus pour ne pas avoir de consensus sur les définitions.

Unités hétérogènes, conversions difficiles et équivalences

La production et les réserves (production future cumulée) sont données en volume ou en tonnes, souvent sans préciser la densité, ce qui rend les conversions difficiles. Il est amusant de lire la plupart des données pétrolières en barils, alors que le baril américain (159 litres) n'est pas une unité légale aux États-Unis. Les organismes fédéraux (qui sont censés depuis 1993 utiliser le SI³) sont obligés, après *barrel*, d'ajouter : « 42 gallons US ». Le baril liquide légal au Texas est de 31,5 gallons. Le refus de l'industrie américaine d'adopter le SI a causé en 1999 la perte de la sonde Mars Climate Orbiter (150 millions de dollars US), car la NASA (National Aeronautics Space Agency) a envoyé les instructions en SI alors que le constructeur Lockheed avait construit la sonde en unités non-SI (*pounds*).

Les productions des champs pétrolifères au Royaume-Uni sont données par le DTI en mètres cubes, alors que les réserves sont données en tonnes, sans préciser la densité (qui varie au cours de la vie du champ).

L'équivalence entre énergies, pour les exprimer généralement en tep (tonnes équivalent pétrole), dépend de conventions. La France avait des conventions différentes de l'AIE tout aussi valables (rendement d'une centrale en moyenne de 30 % ou 40 % ; l'AIE se base sur 33 %), mais en 2001 la DGEMP (Direc-

LEXIQUE ET UNITÉS DE MESURE

bep : baril équivalent pétrole

BTL : *biomass to liquids* (liquides tirés de la biomasse)

CTL : *coal to liquid* (liquides tirés du charbon)

GTL : *gas to liquid* (liquides tirés du gaz)

Mb/j : million de barils par jour (Gb/j : gigabaril par jour, etc.)

NGL : *natural gas liquid* (liquides de gaz naturel)

NOPEP : pays non membres de l'OPEP

MTBE : méthyl ter-butyl éther (ou oxyde de méthyle et de terbutyle)

Tcf : Trillion Cubic Feet = téra pieds cubes = 1000 milliards de pieds cubes (1 pied = 0,3048 mètre)

tep : tonne équivalent pétrole (Gtep : gigatonne équivalent pétrole, etc.)

3. Système international d'unités de mesure adopté par tous les pays, sauf le Liberia et le Bangladesh.

tion générale de l'énergie et des matières premières) s'est alignée sur les conventions de l'AIE, faisant passer le pourcentage du pétrole dans l'énergie finale de la France de 39,8 % à 51,3 %. Ces conventions d'équivalence sont très discutables, mais une fois établies, personne ne veut plus les discuter alors même que le monde change !

Incertitude des données

Production

Les chiffres de production sont manipulés, en particulier au niveau des pays de l'OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole) où sévit, depuis 1986, une bagarre sur les quotas, qui sont établis notamment sur la base des réserves et de la population — donc mensonge sur la production et les réserves. Les volumes d'exportation fournis par les pays producteurs sont considérés comme peu fiables ; seules les estimations vendues par la compagnie d'espionnage Petrologistics à Genève (qui place des espions sur les quais de chargement) sont jugées valables. Et si l'on ajoute les problèmes de

Tableau 1 — Production mondiale de pétrole en 2004 (en Mb/j)				
Source	DGEMP	USDOE	AIE	BP Review
Brut	68,5	72,5	80,7	–
Liquides de gaz	10	7,43	OPEC 4,3	Inclus
Synthétiques	–	Inclus	–	CTL exclus
Gains / raffinage	3,3	1,9	NOPEC 1,8	Exclus
Total	81,8	83	83,1	80,26

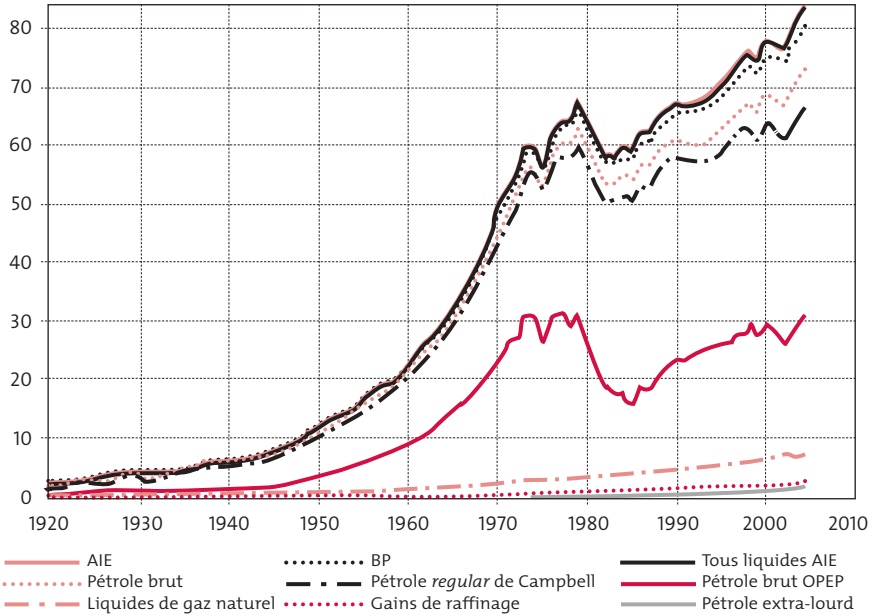
définition de produit à ceux de conversion du tonnage en volume, on peut alors constater des écarts considérables, en 2004, pour les chiffres de production suivant les sources (tableau 1).

Les condensats ⁴, qui se condensent en tête de puits, sont souvent groupés avec le brut, notamment aux États-Unis, mais pas dans l'OPEP car ils sont hors quotas. Les liquides (propane, butane) de gaz naturel (surtout non associé) sont extraits dans les usines de traitement de gaz, et dépendent de la richesse du gaz en liquides et de la valorisation des liquides par rapport au prix du gaz.

Le gain de raffinage (bilan des raffineries entre l'entrée et la sortie) est important en volume (peu en poids) car le pétrole lourd est transformé en pétrole léger (pour obtenir davantage d'essence) par craquage catalytique et hydrogénation (hydrogène venant du gaz naturel). Il représente, d'après l'USDOE, 1,9 Mb/j — plus que l'extra-lourd de l'Athabasca (1 Mb/j) et de

4. Mélange constitué en grande partie de pentanes et d'hydrocarbures plus lourds, qui est récupéré ou récupérable d'un réservoir par un puits. Le condensat peut être sous forme gazeuse à son état originel dans le réservoir, mais il est à l'état liquide aux conditions auxquelles son volume est mesuré ou estimé (NDLR).

Graphique 1 — Production mondiale quotidienne de pétrole (brut ou liquides), en Mb/j



Sources : USDOE (U.S. Department of Energy), AIE (Agence internationale de l'énergie) et BP (British Petroleum).

l'Orénoque (0,6 Mb/j) — mais 3,3 Mb/j d'après la DGEMP⁵, soit une différence de 75 %. Plus de la moitié du gain de raffinage vient des États-Unis où il est classé comme offre domestique, même si le brut est importé. Il faut aussi noter qu'une bonne partie du pétrole consommé par les forces militaires américaines à l'étranger disparaît complètement des inventaires mondiaux.

Ainsi, la production de pétrole peut représenter différents produits et varie, en 2004, entre 66 Mb/j : le pétrole conventionnel (*regular oil*) selon Colin Campbell ; 73 Mb/j : le brut ; et 83 Mb/j : les liquides, qui incluent les liquides de gaz, le pétrole synthétique de la biomasse, du charbon et du gaz, et enfin les gains de raffinage (en volume).

L'USDOE compte comme liquides les alcools en provenance de la biomasse (BTL), les liquides en provenance du charbon (CTL) et du gaz (GTL) ou des schistes bitumineux (*oil shale*), des MTBE (oxyde de méthyle et de ter-

5. *L'Industrie pétrolière en 2004*. Paris : ministère de l'Industrie, DGEMP, 2005.

Tableau 2 — Les plus gros producteurs de liquides autres que le brut en 2003 (en Mb/j)

	Brut	NGL	Gains de raffinage	Autres liquides	Tous liquides
Monde	69,2	7,5	1,9	1	79,5
États-Unis	5,7	1,7	1,0	0,4	8,7
Brésil	1,5	0,05	0,04	0,25	1,8
Afrique du Sud	0,03	0,0	0,01	0,17	0,2
Venezuela	2,3	0,2	0,02	0,10	2,5
Arabie Saoudite	8,8	1,2	-0,01	0,08	10

Source : USDOE.

butyle) et d'orimulsion⁶. Le Brésil produit 250 000 b/j d'alcool de canne à sucre et l'Afrique du Sud 170 000 b/j de CTL.

Réserves

La découverte d'un champ découle de l'idée d'une équipe de géologues et de géophysiciens qui, à partir de données sismiques fournissant la structure des éventuels réservoirs, calibrée grâce à des puits, tente de reconstituer les conditions nécessaires d'un système pétrolier composé d'une roche mère, d'un réservoir et d'un piège.

Les données des puits et de la sismique permettent d'estimer le volume en place de la découverte. Un coefficient de récupération approximatif est introduit pour obtenir les réserves, qui sont la quantité qui est espérée être récupérée à l'abandon de la production du champ. Aussi, le terme « réserves récupérables » est un pléonasme. Après de nouveaux forages d'appréciation et études sismiques complémentaires (3D), si la décision de développement est prise, les forages de développement sont effectués et les structures de développement installées. On démarre dès le début la récupération primaire (déplétion de la pression naturelle) et la récupération secondaire (injection d'eau ou de gaz pour maintenir la pression et pousser le pétrole vers les puits de production). La production commence et les données de production (volume et pression) permettent d'affiner la simulation et l'estimation des réserves.

Le pétrole (le sous-sol) appartient à l'État dans tous les pays du monde, sauf aux États-Unis où il appartient aux propriétaires du sol (particuliers ou États). Les données de réserves par champ sont confidentielles dans la plupart des pays, surtout au Moyen-Orient, en ex-Union soviétique et en France, mais pas en Grande-Bretagne, en Norvège ni au niveau de l'État fédéral amé-

6. L'orimulsion est un hydrocarbure à base de bitume, transporté et employé dans le monde entier comme un combustible alternatif pour la production d'énergie électrique. C'est un mélange d'approximativement 70 % de bitume, 30 % d'eau et moins de 0,2 % de masse tensio-active (NDLR).

ricain où l'on donne le détail (à jour) par champ. Les réserves de pétrole par champ sont de nouveau un secret d'État depuis 2000 en Russie et divulguer les réserves est un délit passible de sept ans de prison. Mikhaïl Khodorkovski aurait pu être emprisonné pour ce seul délit de divulgation des chiffres de réserves de Yukos !

L'incertitude présentée comme certitude

Les réserves sont incertaines, mais la plupart des définitions, comme les règles de la SEC (Securities and Exchange Commission des États-Unis), parlent de « certitude raisonnable pour l'existence des réserves » (la FDA, Food & Drug Administration, utilise les mêmes termes : « certitude raisonnable quant à l'innocuité », lors de l'approbation d'un nouveau produit), et refusent l'approche probabiliste en raison de l'aversion pour le risque des banquiers et des actionnaires.

Alors que le Canada admet depuis 2001 la publication des réserves probables, la SEC utilise des règles datant de plus de 25 ans, périmées et contraires à la pratique du reste du monde. La SEC oblige les compagnies à ne pas publier ni les projets non signés ni les réserves probables, de façon à obtenir des valeurs minimum qui, dans le futur, feront l'objet de croissance pour satisfaire banquiers et actionnaires.

Les réserves prouvées des champs sont additionnées pour obtenir la valeur dite prouvée du pays, alors que cette addition n'est pas correcte (il faut faire une simulation dite de Monte-Carlo tenant compte des probabilités), car elle sous-estime le total, conduisant à une croissance supplémentaire. Seules les valeurs espérées (appelées prouvées + probables) des champs peuvent être additionnées pour obtenir la valeur espérée des réserves du pays. Ces règles SEC devraient être changées, mais l'industrie américaine n'aime pas s'aligner sur le reste du monde (comme le montrent les exemples du système métrique ou de la carte de crédit à puce).

En ex-Union soviétique, les réserves sont grossièrement exagérées en raison d'une classification spéciale définie en 1979, qui prend la récupération théorique maximale, tout à l'opposé des règles américaines. Les Russes ont demandé aux Nations unies (NU) de sortir de nouvelles définitions mondiales des réserves pour les hydrocarbures, le charbon et l'uranium, mais celles-ci ont sorti un très mauvais compromis⁷ qui, voulant satisfaire tous les pays, a conservé les termes du passé sous un habillage moderne. Le compromis a massacré l'approche probabiliste (selon laquelle la moyenne, le plus probable et la médiane sont tous considérés comme la meilleure estimation). De toute

7. *United Nations Framework Classification for Energy and Mineral Resources*. New York : Nations unies, 26 avril 2004.

façon, dans les faits, le texte des Nations unies est ignoré par tous les professionnels du pétrole, tout comme la version précédente de 1997. J'ai été membre de la force de travail sur les réserves SPE / WPC 1997 (Society of Petroleum Engineers / World Petroleum Congress) : la classification NU 1997 n'était pas prise en considération, chacun suivant sa propre méthode d'évaluation.

Dans le reste du monde, les réserves incluent les réserves prouvées plus celles probables (règles SPE / WPC) et sont proches de la valeur espérée qui, statistiquement, ne devra pas croître. Individuellement, un champ pourra voir ses réserves augmenter ou diminuer, mais dans l'ensemble, le total des champs ne changera guère.

Dans les pays OPEP du Moyen-Orient, les réserves officielles dites « prouvées » déterminent les quotas. Elles ont augmenté de 300 Gb de 1985 à 1990, alors que les vraies découvertes n'ont été que de 10 Gb, en raison de la bagarre sur les quotas entre les membres de l'OPEP en face du contre-choc de 1985. Ces pays trichent aussi sur le montant de leur production, car ils ne respectent pas les quotas. Des compagnies d'espionnage vendent très cher les données mondiales : Petrologistics pour la quantité de pétrole transportée sur mer ; IHS Energy (ex-Petroconsultants) ou Wood Mackenzie (WM) pour les réserves et la production des champs du monde hors États-Unis.

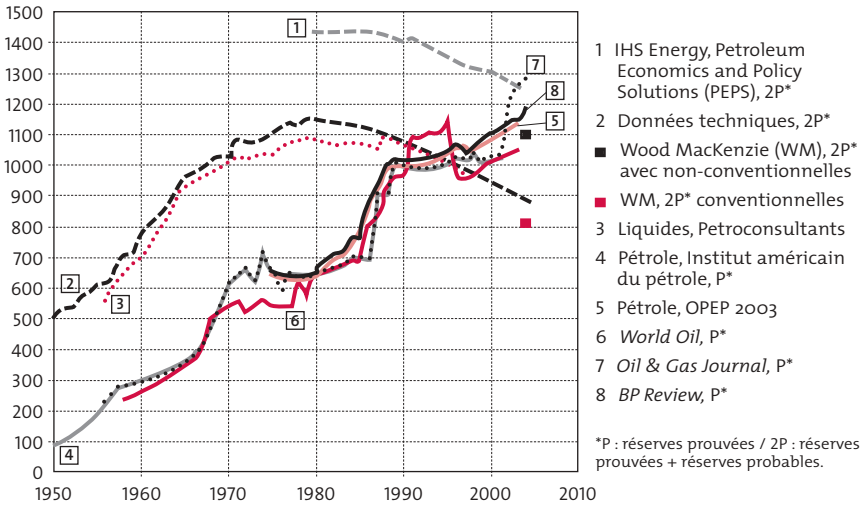
Une enquête mondiale pour obtenir les réserves restantes par pays à la fin de l'année (en fait le 1^{er} janvier de l'année suivante) auprès des gouvernements est publiée par l'*Oil & Gas Journal* avant la fin de l'année, c'est-à-dire avant que toute étude technique ne soit faite. Elle montre l'incohérence des données officielles, avec l'absence fréquente de changement des réserves, surtout pour les membres de l'OPEP. Fin 2004, 83 pays sur 105 n'ont pas changé leurs chiffres de réserves de pétrole par rapport à fin 2003, comme si leur production annuelle était exactement égale aux réserves ajoutées dans l'année. C'est une farce ! Mais ces données politiques sont officielles et ce sont les seules publiées ; elles sont donc utilisées par les économistes comme si elles étaient vraies, en dépit des variations parfois considérables entre sources. Les chiffres des réserves prouvées mondiales fin 2004 sont ridiculement précis, alors même qu'ils divergent parfois fortement. Donner plus de deux chiffres significatifs pour des données pétrolières montre l'incompétence des auteurs : puisque le deuxième chiffre est différent, les suivants sont inutiles ! On doit

toujours adapter le nombre de chiffres significatifs à la précision des mesures.

Tableau 3 — Estimation des réserves d'hydrocarbures fin 2004 selon les sources		
	Pétrole (en Gb)	Gaz (en Tcf)
<i>BP Statistical Review</i>	1 188,555 694 069 4	6 337,364 557 3
<i>Oil & Gas Journal</i>	1 277,701 992	6 040,208
<i>World Oil</i>	1 082,333 0	6 994,298 4
Cedigaz		6 358,575

Les données techniques par champ sont confidentielles et ne sont disponibles qu'au-

Graphique 2 — Réserves mondiales de pétrole conventionnel restantes d'après des sources politiques et techniques (en Gb)



près de compagnies d'espionnage industriel. J'ai la chance d'y avoir accès pour toutes les données par champ hors États-Unis (plus de 25 000 champs) et pour les champs majeurs aux États-Unis — mais elles sont hétérogènes entre États-Unis, Canada, ex-Union soviétique et le reste du monde, pour les raisons méthodologiques expliquées précédemment. Je corrige ces données actuelles pour les ramener à la valeur moyenne (espérée) à la date de découverte (*back-dating*), en tenant compte des sources différentes. C'est ainsi que j'arrive à 2 000 Gb de réserves ultimes pour le pétrole brut excluant l'extra-lourd. Ce sont les données techniques qui, analysées en termes de réserves restantes, ont culminé en 1980 ! Les réserves d'extra-lourd ont peu changé depuis 1970 ⁸.

Les réserves politiques sont les réserves prouvées courantes où les révisions des découvertes passées sont reportées à l'année de révision, donnant une idée fautive du passé car elles montrent une croissance continue depuis plus de 50 ans.

L'objectif des réserves prouvées est de fournir de la croissance, chère aux dirigeants. Les économistes nous qualifient de « pessimistes » lorsque nous montrons ces données techniques. Pour Clare Booth Luce ⁹, « la différence

8. SALVADOR Amos. « Energy: a Historical Perspective and 21st Century Forecast ». AAPG (American Association of Petroleum Geologists) *Studies in Geology*, n° 54, 2005.

9. Auteur, journaliste, femme politique et diplomate américaine (1903-1987) (NDLR).

entre un optimiste et un pessimiste réside dans le fait que le pessimiste est généralement mieux informé ».

L'approche par les probabilités

Les financiers et les politiciens n'aiment pas le risque ni les probabilités. De plus, l'approche probabiliste en exploration et production est surtout subjective car tous les objets sont différents, au contraire du tirage à pile ou face. Les probabilités subjectives font appel au sentiment des explorateurs et des producteurs sur ce qui leur semble le minimum, le maximum et le plus probable des paramètres d'un champ (surface, épaisseur, porosité, saturation). Ces estimations changent au gré des connaissances et des humeurs des auteurs. Les géologues, qui ont le droit à l'erreur (puisque 9 sur 10 des puits en exploration frontière sont secs), sont plutôt optimistes, alors que les ingénieurs réservoir et production sont plutôt pessimistes, parce qu'ils n'ont pas le droit à l'erreur et que si l'estimation augmente avec le temps, ils pourront dire que cela est le résultat de leurs actions. La distinction entre médiane (probabilité cumulée de 50 %), mode (valeur la plus probable) et moyenne (valeur espérée) est difficile.

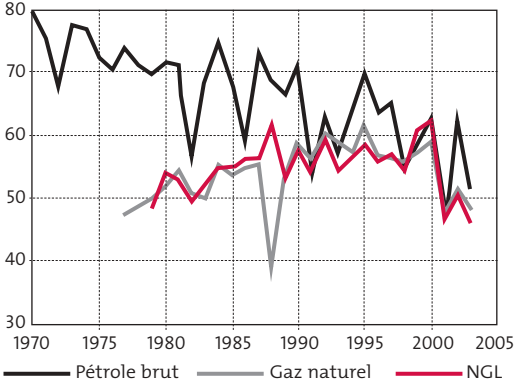
L'usage des probabilités n'est pas simple, de même que celui du calcul d'erreur qui lui est attaché. Il faut fournir une distribution des probabilités d'un paramètre et l'on utilise un ordinateur pour faire des tirages au hasard (simulation de Monte-Carlo avec au moins 50 000 tirages) pour donner les valeurs statistiques. La façon dont les objets incertains sont publiés avec un nombre impressionnant de décimales, malgré un écart considérable par rapport à l'estimation d'une autre source, montre bien la méconnaissance de ce sujet. Les dirigeants sont obligés de faire des choix dans cette fourchette pour une présentation extérieure, en ne publiant qu'un seul chiffre qui peut être, suivant l'image que l'on veut donner, le minimum, le maximum ou la moyenne. Enfin, la diffusion aux médias des probabilités est souvent basée sur des vœux pieux.

La NASA estimait la probabilité d'accident de la navette spatiale à 1 sur 100 000. Richard Feynman, prix Nobel de physique, dans l'enquête sur l'accident de *Challenger* au 25^e vol en 1986, l'a ramenée à 1 sur 100. L'accident de *Columbia* en 2003, au 107^e vol, montre que ce 1 sur 100 était optimiste.

Probabilité des réserves américaines

Bien que les réserves des États-Unis soient régies par les règles de la SEC qui refuse toute approche probabiliste (la SPE l'a refusée jusqu'en 1997), il est facile de calculer la probabilité de l'estimation des réserves prouvées américaines d'après les rapports annuels de l'USDOE / AIE, qui publient les révi-

Graphique 3 — Révisions des réserves prouvées de pétrole brut et gaz naturel aux États-Unis, donnant la probabilité (%) de l'estimation*



*Ratio révisions positives / (révisions positives + révisions négatives), en %.

Source : rapports annuels USDOE.

sions positives et les révisions négatives. Le *ratio* révisions positives sur le total (positif + négatif) donne la probabilité de l'estimation. Quand les révisions positives sont égales aux révisions négatives, la probabilité est de 50 %.

La tendance est évidente, diminuant de 75 % en 1970 vers 50 % pour le pétrole. Il ne peut plus y avoir de croissance de réserves prouvées aux États-Unis lorsque les révisions négatives sont supérieures aux révisions positives. En 2003, les révisions négatives les plus fortes étaient dans l'*offshore* fédéral

de Louisiane avec 616 Mb de négatif pour 289 Mb de positif pour le pétrole, 129 Mb négatif contre 89 Mb positif pour les liquides de gaz, et 2,9 Tcf négatif contre 1,9 Tcf positif pour le gaz.

Les réserves prouvées des États-Unis sont prétendues suivre les règles SPE / WPC où la probabilité est d'au moins 90 % pour le prouvé. En réalité, les réserves prouvées américaines correspondent aux réserves prouvées + probables SPE / WPC, où la probabilité d'existence est évaluée à 50 %.

Le futur, les prévisions

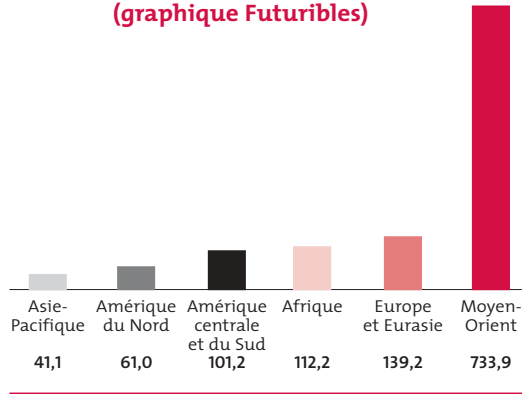
Estimation des réserves ultimes

La courbe d'écrémage représente les découvertes techniques cumulées en fonction du nombre cumulé de puits d'exploration pure (*New Field Wildcat*, NFW). Cette courbe est toujours facilement modélisée avec plusieurs hyperboles ; l'extrapolation de la dernière hyperbole permet d'avoir la valeur ultime s'il n'y a pas de nouveau cycle. Cette forme d'hyperbole correspond à la loi bien connue du rendement décroissant de l'exploration minière (graphique 4).

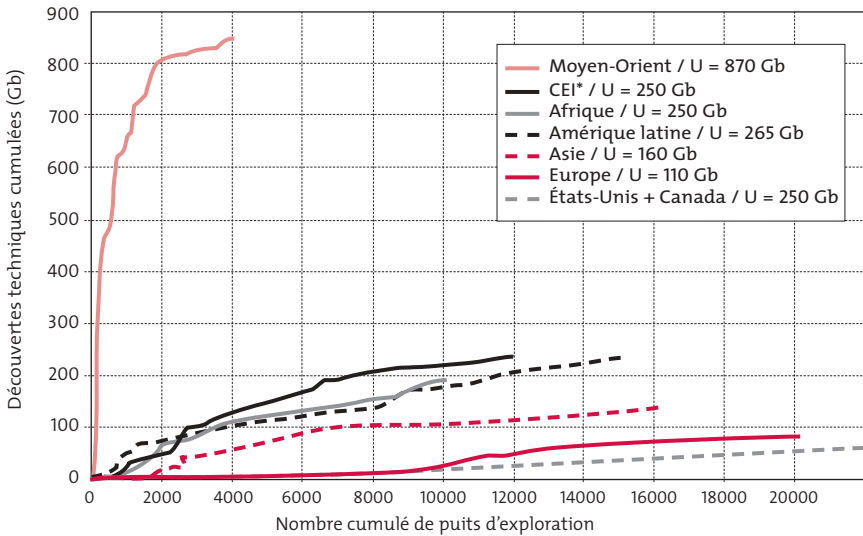
L'asymptote du modèle hyperbolique donne les réserves ultimes (c'est-à-dire la production cumulée + les réserves restantes à produire + ce qui reste à découvrir). En fait, on choisit la valeur correspondant à un cumul de puits

d'exploration double de l'actuel. Ces estimations sont faites à partir des données d'IHS Energy, mais les données WM conduisent à des estimations plus basses comme l'indique le graphique 2. La valeur ultime mondiale des réserves de pétrole brut (excluant seulement le pétrole extra-lourd) est estimée à 2 000 Gb. Ce chiffre rond indique bien l'incertitude de cette estimation.

Les réserves prouvées de pétrole (en Gb) par continent fin 2004, selon BP (graphique Futuribles)



Graphique 4 — Courbe d'écrémage du pétrole conventionnel par continents et réserves ultimes (U) mondiales de 2150 Gb



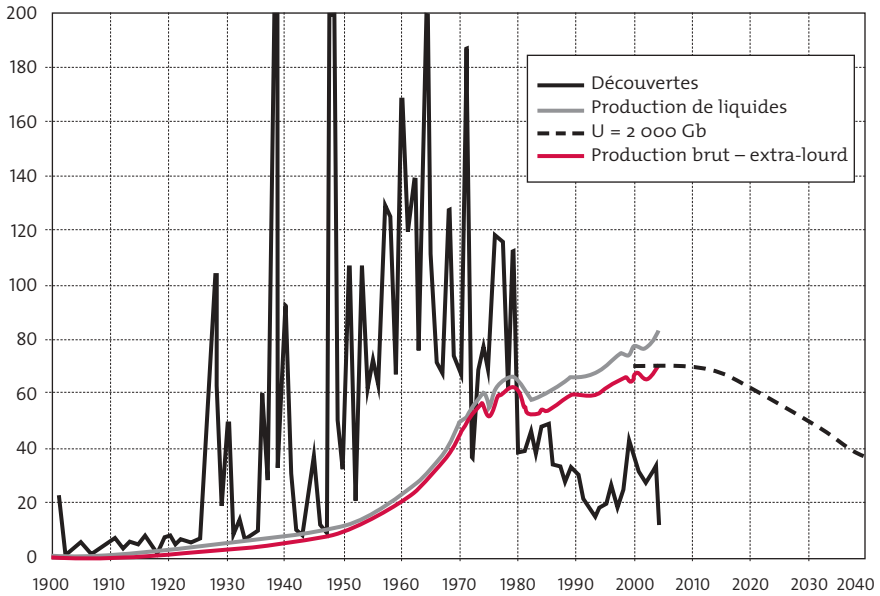
*CEI : Communauté des États indépendants.

Source : données IHS Energy corrigées.

Corrélation découverte / production

Dans le graphique 5, page suivante, les découvertes annuelles sont comparées aux productions.

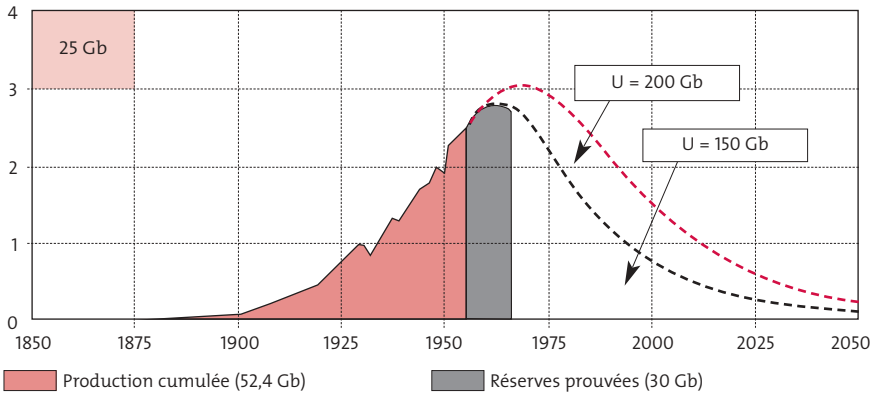
Graphique 5 — Découverte et production annuelle mondiale de pétrole conventionnel* (en Mb/j) avec modèle (courbe de Hubbert) pour des réserves ultimes (U) de 2 000 Gb (surface sous la courbe)



*Brut moins extra-lourd.

Source : données IHS Energy et USDOE corrigées.

Graphique 6 — Courbe de Hubbert en 1956 : prévision de la production de pétrole des États-Unis (hors Alaska), en Gb/a



Source : HUBBERT King M. « Nuclear Energy and Fossil Fuels ». *Drilling & Production Practice, Proceedings de la conférence de printemps de l'American Petroleum Institute, San Antonio (Texas), 1956.*

Depuis 1980, la production annuelle de pétrole est environ le double des découvertes. Les réserves restantes de pétrole conventionnel diminuent donc depuis 1980. Le pétrole extra-lourd comprend essentiellement les sables bitumineux du Canada (Athabasca, connus depuis 250 ans et dont le premier pilote date de 1930) et les huiles extra-lourdes (aussi lourdes, mais moins visqueuses car plus chaudes) du Venezuela (Orénoque) découvertes depuis 1936.

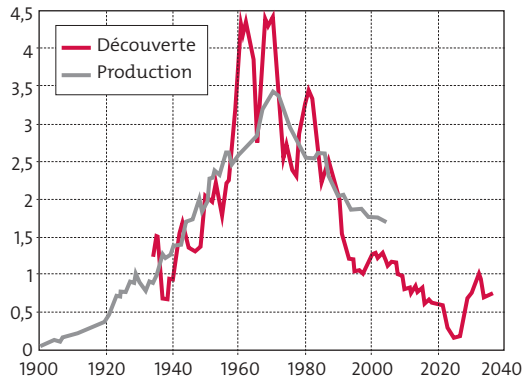
Prévision de production pétrolière

En 1956, King Hubbert (géophysicien de Shell) a prévu le pic de pétrole aux États-Unis pour 1970 (l'Alaska n'a rejoint les États-Unis qu'en 1959), pour des réserves ultimes de 200 Gb (estimation la plus haute du moment), et pour 1965 pour des réserves ultimes de 150 Gb (son estimation).

Sur le graphique 7, la production annuelle des États-Unis hors Alaska est comparée à la courbe des découvertes annuelles (valeur espérée moyennée sur cinq ans) décalée de 32 ans. La courbe de production imite la courbe de découverte. Le décalage permet la prévision de la production sans aucune modélisation.

Pour les États-Unis hors Alaska, il n'y a qu'un cycle (très grand nombre de producteurs = mouvement brownien !) mais en France, il y a deux cycles de découverte et deux cycles de production. Il en est de même au Royaume-Uni.

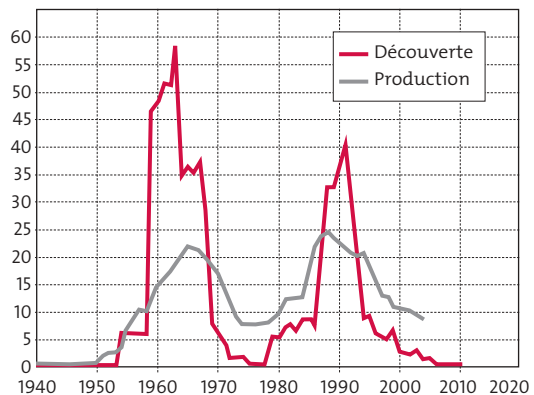
Graphique 7 — Production de pétrole des États-Unis hors Alaska et découverte moyenne* décalée de 32 ans (en Gb/an)



*Moyenne lissée sur cinq ans.

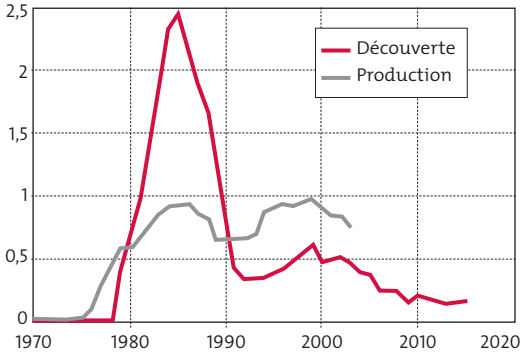
Source : données USDOE corrigées.

Graphique 8 — Production de pétrole de la France et découverte moyenne* décalée de sept ans (en Mb/an)



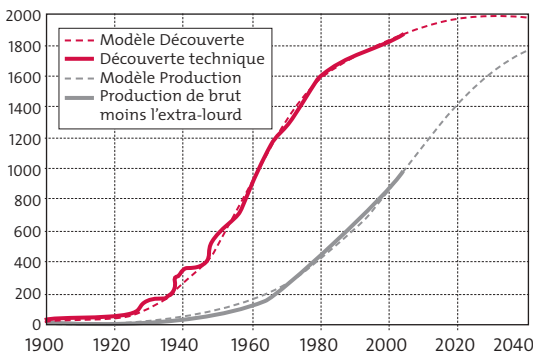
*Moyenne lissée sur cinq ans.

Graphique 9 — Production de pétrole du Royaume-Uni et découverte moyenne* décalée de 12 ans (en Gb/an)



*Moyenne lissée sur sept ans.

Graphique 10 — Découvertes et productions cumulées mondiales de pétrole conventionnel (en Gb) avec modèles logistiques pour des réserves ultimes de 2 000 Gb*



*À noter le deuxième cycle associé à l'*offshore* profond pour environ 100 Gb.

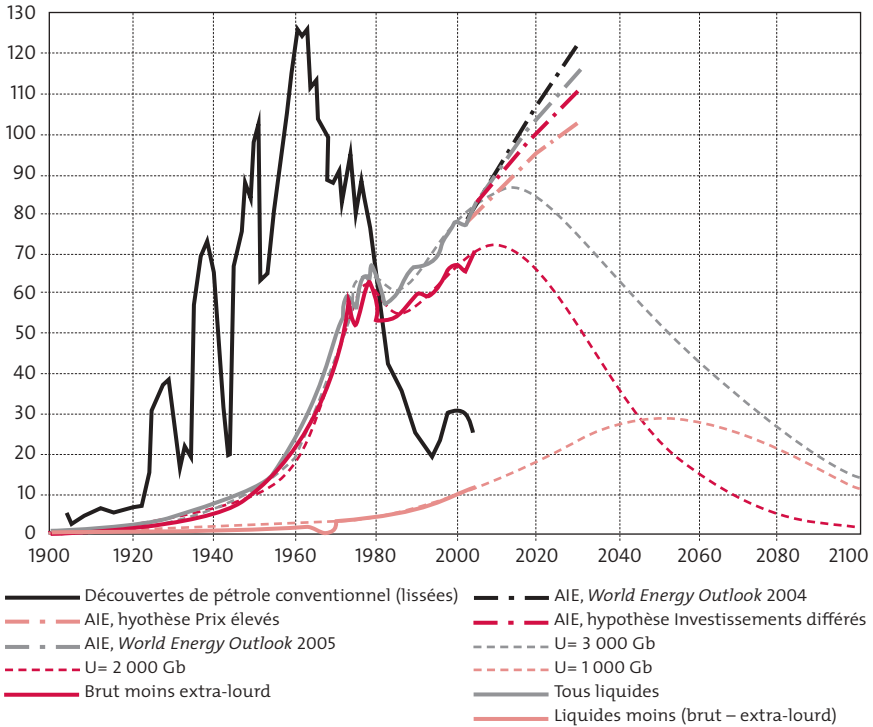
Les quantités cumulées sont plus faciles à modéliser, notamment avec des courbes dites en S ou logistiques (croissance rapide suivie d'une décroissance rapide et stabilisation à une valeur asymptotique).

Un seul cycle n'est constaté que pour les pays avec un grand nombre de champs et d'acteurs, et sous réserve que n'apparaisse pas un deuxième cycle. Pour la plupart des pays, il y a plusieurs cycles de découverte et de production. Le monde avec plus de 50 000 champs conventionnels découverts offre une courbe de découverte cumulée proche d'une courbe logistique avec des réserves ultimes de 2 000 Gb pour le pétrole (et 1 700 Gbep, soit 10 000 Tcf, pour le gaz). La courbe de production cumulée suit aussi une courbe logistique ayant la même réserve ultime (graphique 10).

On s'aperçoit que ce qui reste à découvrir représente moins de 150 Gb, c'est-à-dire moins que l'imprécision de ce qui a été déjà découvert.

Mais le pétrole conventionnel n'est qu'une (grosse) partie de la demande de liquides. Il y a en outre les condensats, les liquides de gaz naturel, le pétrole synthétique (sables bitumineux, pétroles extra-lourds, biomasse, gaz, charbon) et les gains en volume des raffineries. Après plus de 10 ans de travail, ma dernière estimation peut être résumée par ces chiffres simples et arrondis pour montrer l'incertitude : 2 000 Gb pour le brut hors extra-lourd, 500 Gb pour l'extra-lourd, 250 Gb pour les liquides de gaz et 250 Gb pour le

Graphique 11 — Découverte de pétrole et prévision de production mondiale de liquides (sans contrainte de demande) pour des réserves ultimes (U) de 3 Tb* avec prévisions AIE 2004 (en Mb/j)**



*Colin Campbell (ASPO) utilise un ultime de 2,4 Tb. **25 dollars US le baril en 2004 et 35 dollars US en 2030.

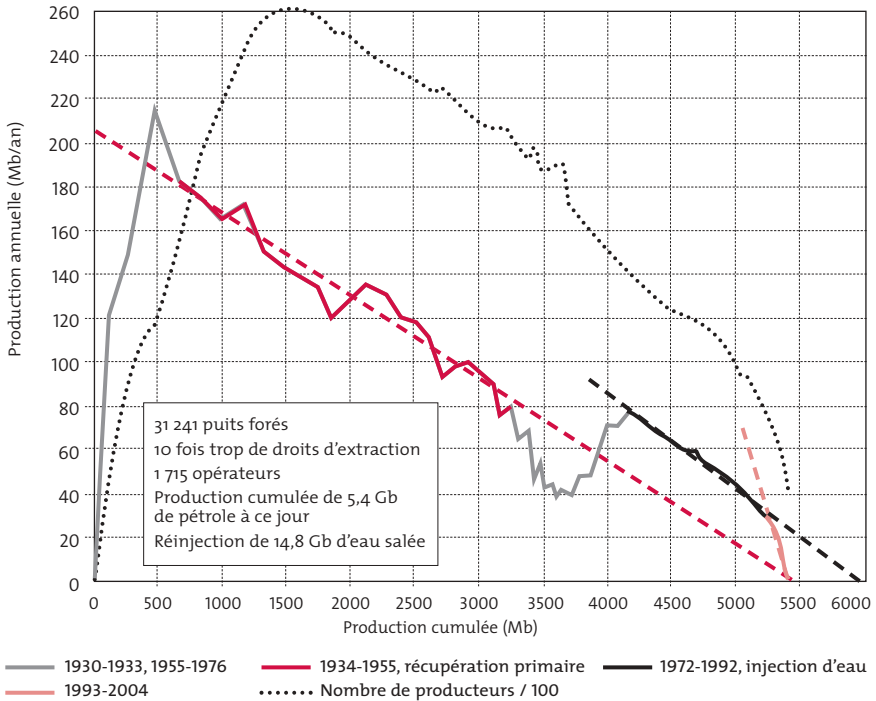
pétrole synthétique (à partir de matière organique, charbon, gaz ou biomasse, c'est-à-dire le soleil, l'eau et le CO₂) et les gains de raffinage, donnant un total de 3000 Gb ou 3 Tb.

Le pic que peut connaître l'offre se situe dans la prochaine décennie s'il n'y a pas de contrainte de la demande. S'il y a chute de la demande (prix élevés ou dépression économique), il y aura un plateau en tôle ondulée (oscillation chaotique des prix et de la demande). Les prévisions de l'AIE sont différentes car elles ne visent qu'à satisfaire les objectifs politiques des pays qui ont pour but la croissance économique.

Croissance des réserves

L'USGS (United States Geological Survey, Reston, Virginie) a publié en 2000 l'estimation des réserves découvertes et à découvrir d'ici 2025. Il estime que

Graphique 12 — Déclin 1930-2003 de la production de pétrole du plus gros champ de pétrole des États-Unis hors Alaska : East Texas



plus de 700 Gb seront ajoutés d'ici 2025 comme croissance des découvertes passées dans le monde, sans autre justification que quelques exemples comme la croissance des vieux champs américains tels que Midway-Sunset (champ de pétrole lourd non conventionnel produit avec de la vapeur) découvert il y a plus de 100 ans. En outre, si on retire ces cas exceptionnels, la croissance des réserves est attribuée au progrès technologique alors qu'elle résulte en réalité de la mauvaise estimation initiale des réserves en raison de règles absurdes utilisant les données financières au lieu des données techniques.

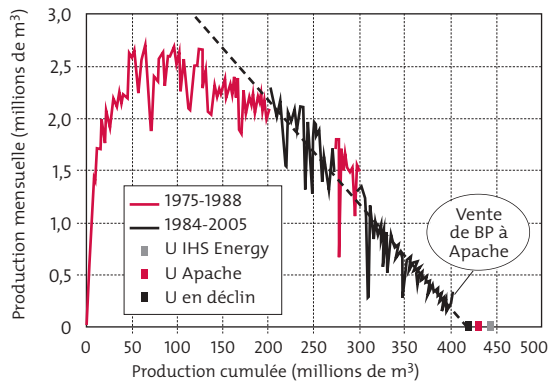
East Texas est le plus grand champ de pétrole aux États-Unis hors Alaska ; il produit depuis 1930. Au début, la production se faisait par récupération primaire (déplétion naturelle), avec un déclin indiquant des réserves ultimes (U) à 5,5 Gb. Puis, après unitisation¹⁰ et injection d'eau (pour remonter la

10. Dans un champ ayant plusieurs propriétaires opérant chacun de son côté, sans se préoccuper de produire le maximum du champ, l'on peut « unitiser », c'est-à-dire décider de la part de chaque propriétaire dans les réserves du champ et désigner un seul opérateur en charge d'exploiter le champ de la façon optimale, chaque propriétaire recevant ensuite sa part de profit selon le pourcentage établi. L'unitisation est en général réalisée à l'initiative des États.

pression), il y a eu remontée de la production avec un déclin indiquant des réserves ultimes de 6 Gb, ce qui justifiait l'apport positif de la technologie. Mais malheureusement, depuis 1995, le déclin s'est accéléré, se dirigeant vers un ultime de 5,5 Gb. L'apport technologique a conduit, comme dans la plupart des cas de champs conventionnels, à produire plus vite et moins cher, mais pas plus.

Le champ de Forties, dans la mer du Nord britannique, était en déclin en 1987 quand fut ajoutée une injection de gaz avec une cinquième plate-forme. Pendant deux ans, la production a un peu augmenté par rapport au déclin antérieur, mais pour le reprendre ensuite. J'ai présenté ce graphique (13) il y a sept ans et la production des sept dernières années est en ligne avec ma prévision d'alors. L'opérateur BP a vendu, il y a deux ans, le champ à Apache qui, en petit indépendant, sait produire moins cher et gagnera plus que BP, non avec la technique, mais avec moins de frais généraux !

Graphique 13 — Déclin de la production de pétrole de Forties (Royaume-Uni) 1975-2005



Source : DTI (Department of Trade and Industry), Londres.

Outre ces deux exemples de croissance négative ou nulle, il y a aussi des exemples de croissance positive, mais ces exemples correspondent toujours à des cas exceptionnels qui ne sont pas extrapolables au reste des champs. Ekofisk, en mer du Nord norvégienne, en production depuis 1971, a présenté un premier pic en 1975, suivi en 1988 d'une croissance importante qui s'est arrêtée en 2002. En effet, le réservoir est constitué de craie et sous l'effet de l'injection d'eau, cette craie s'est fissurée, compactée causant un effondrement du fond de la mer de sept mètres, ce qui a nécessité de surélever à grands frais les plates-formes. Cette compaction a provoqué une bien meilleure récupération du pétrole et les estimations de réserves sont montées de 160 à 550 millions de mètres cubes. L'extrapolation des deux dernières années (peu fiable) donne un chiffre plus élevé à 800 millions, mais l'estimation du NPD à 550 millions de mètres cubes doit être meilleure, car la production d'eau monte depuis 2000 de façon inquiétante.

Cependant, la croissance d'Ekofisk ne peut être appliquée au reste des champs de la mer du Nord qui n'ont pas un tel réservoir de craie susceptible de se compacter en créant une subsidence importante du fond de la mer.

Prévisions basées sur le nombre d'années de réserves rapporté à la production actuelle (R/P)

L'un des paramètres les plus utilisés par les médias est le nombre d'années de réserves restantes en production actuelle. Il est ainsi publié qu'il reste 40 ans pour le pétrole, suggérant que la production actuelle peut être maintenue à ce niveau pendant 40 ans. Les économistes estiment donc que « tout va très bien Madame la Marquise » puisqu'il reste encore pour 40 ans de production de pétrole. Cependant, ce *ratio* pose au moins trois problèmes :

— Le dénominateur : les organismes officiels admettent, en même temps, que la demande va croître ces 30 prochaines années, ce qui implique, *ipso facto*, la croissance de la production.

— Le numérateur : les chiffres de réserves utilisés sont les données officielles, donc politiques, donc fausses.

— Ce *ratio* ne correspond pas à la physique d'extraction : les lois physiques ne peuvent permettre de garder une production constante pendant 40 ans, qui s'écroulerait à zéro la 41^e année. La production d'un puits décline très vite après une montée à la pression initiale, en fonction de la chute de pression. La production d'un champ monte jusqu'à un plateau en fonction du nombre de puits et de la contrainte de débit, puis chute plus ou moins suivant les injections d'eau et de gaz. La production d'un pays monte et décline en fonction du potentiel des champs, du nombre de champs développés, des investissements et des contraintes politiques.

Les réserves prouvées américaines donnent un *ratio* R/P d'environ 10 ans depuis 80 ans, montrant bien que ce *ratio* n'a aucun sens en prévision, même si les réserves sont souvent estimées (même par l'USGS) en prenant la règle pratique (*rule of thumb*) de multiplier par 10 la production annuelle.

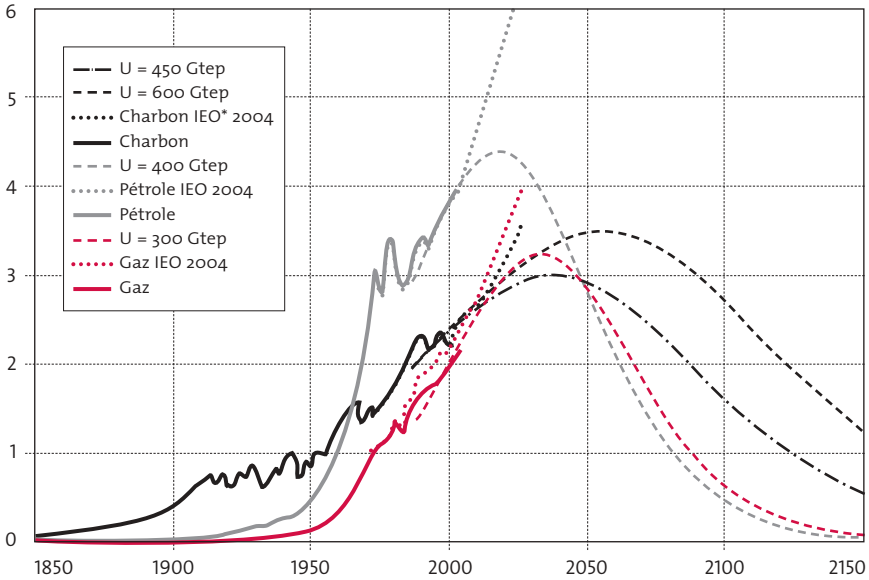
Si on prend, non pas les données politiques ou financières, mais les données techniques pour le monde, le *ratio* R/P était de 140 ans en 1900, il est descendu à 50 ans en 1925, pour remonter à 150 ans en 1945, et se situe actuellement à 35 ans. Ce *ratio* est donc un très mauvais paramètre ; mais il est utilisé par tout le monde...

Les facteurs d'influence sur les prévisions

Prévisions pour l'ensemble des combustibles fossiles

Les prévisions officielles (énergie, population) sont des cibles politiques, qui ne se préoccupent pas des réalités. L'estimation, d'après les données techniques, des réserves ultimes pour les combustibles fossiles est de 400 Gtep (3 Tb) pour le pétrole, 300 Gtep pour le gaz, et entre 450 et 600 Gtep pour le

Graphique 14 — Production mondiale annuelle de charbon, pétrole et gaz 1850-2050 (en Gtep/an)



*International Energy Outlook.

charbon. À moins que la demande ne crée un choc anticipé (crise économique), le pétrole déclinera après 2010, le gaz après 2030 et le charbon après 2050 (graphique 14).

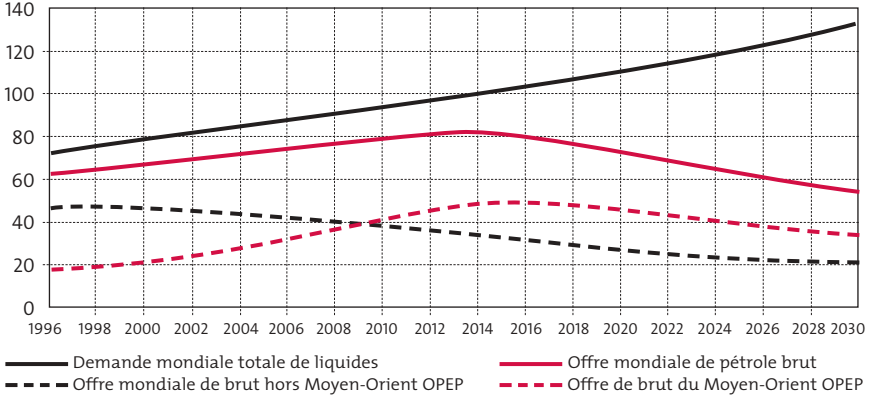
Colin Campbell, dans l'*ASPO Newsletter* d'octobre 2005, prédit un pic des liquides pour 2010 pour des réserves ultimes de 2,4 Tb. Mais, dans ses « autres » liquides, il ne met que les liquides de gaz, excluant les pétroles synthétiques et les gains de raffinage (d'où ses chiffres de 80 Mb/j en 2004 et 74 Mb/j en 2000). Son modèle ne correspond pas au chiffre de la demande publiée par l'USDOE (source publique la plus complète), qui comprend tous les liquides (83 Mb/j en 2004).

Le rôle des personnes

Le message d'un organisme dépend beaucoup de la personne qui le délivre. Les prévisions de l'IAIE ont changé d'une façon évidente ces six dernières années, avec le directeur en charge de l'analyse à long terme, comme en témoignent les graphiques 15 à 17, page suivante.

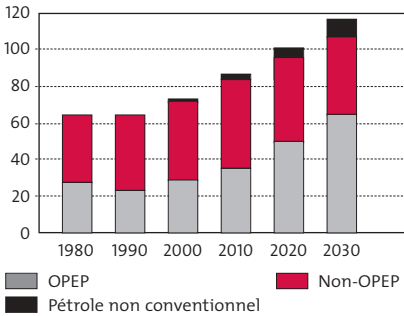
**Graphique 15 — Prévisions de l'offre de pétrole 1996-2030 (AIE 1998)
par Jean-Marie Bourdaire (en Mb/j)**

Il y a problème, car la demande future devrait être alimentée par une offre en provenance de pétrole non conventionnel non spécifié puisque l'offre de pétrole conventionnel va plafonner.



**Graphique 16 — Prévisions de la production mondiale de pétrole (AIE 2002)
par Olivier Appert (en Mb/j)**

Il n'y a plus de problème, ni pic ni beau-coup de pétrole non conventionnel.



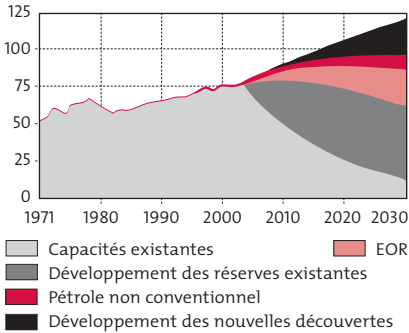
Il y eut le même changement dans les prévisions de l'USGS quand Thomas Ahlbrandt remplaça Chuck Masters. Ce dernier proposait des réserves dites *inferred* (déduction des géologues) mais pas de croissance des réserves. En revanche, Thomas Ahlbrandt applique la croissance des réserves prouvées des États-Unis (pour l'essentiel liée à la révision des chiffres trop conservateurs initiaux), aux réserves prouvées + probables du reste du monde. Il faut comparer des choses comparables ! De plus, c'est bien évidemment une absurdité car la prise en compte des réserves probables dès le départ laisse peu de place à des croissances futures.

Les motivations financières

Ayant commencé ma carrière pétrolière il y a 50 ans, j'ai pu constater de grands changements dans les techniques et dans les comportements. La cor-

Graphique 17 — Prévisions de la production mondiale de pétrole par sources (AIE 2004) par Fatih Birol (en Mb/j)

Il peut y avoir problème car on a besoin de nouvelles découvertes, de davantage de récupération (EOR, enhanced oil recovery), mais le pétrole non conventionnel est toujours peu important.



rélation entre le pic des découvertes (valeurs espérées) et celui de la production est de 35 ans aux États-Unis (1935 versus 1970), et de 40 ans environ pour le monde (1965 versus 2010 peut-être). Des décennies s'écoulent entre les premières campagnes d'exploration et la première production d'un bassin. En outre, l'industrie pétrolière de l'époque était globalement surcapacitaire, avec des tendances malthusiennes oligopolistiques consistant à limiter les taux de production au niveau de la demande réelle, seul moyen d'éviter un effondrement des prix.

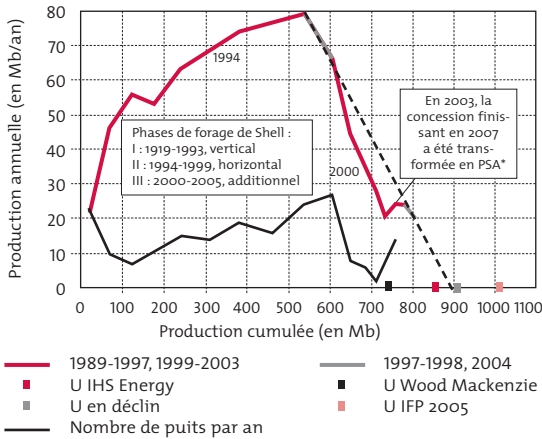
Une des conséquences était que l'industrie pétrolière d'il y a 50 ans raisonnait en long terme et cherchait davantage à produire un champ de

façon à en extraire le maximum de pétrole en contrôlant une montée douce et lente du plan d'eau, qu'à produire très rapidement. Les choses ont changé avec la disparition des surcapacités de production, la fin de l'oligopole des Sept Sœurs ¹¹, et l'augmentation de la pression financière des actionnaires, en particulier les fonds de pension qui réclament des rentabilités élevées (plus 15 % par an). Avec de tels taux, le baril produit dans 10 ans a peu de valeur, même dans l'hypothèse d'une augmentation de son prix.

D'où la tyrannie du court terme et la nouvelle « bonne » pratique consistant à produire le profit maximum actualisé, éventuellement au détriment de la récupération théorique maximum. Ceci n'est pas nécessairement négatif mais peut le devenir. Ainsi, une technologie comme le forage horizontal permet de produire beaucoup plus aujourd'hui, avec un déclin beaucoup plus rapide en fin de déplétion. La récupération finale peut être affectée, parfois moindre, parfois meilleure grâce à la possibilité de produire des poches autrefois non économiques. Ce qui s'est passé avec Shell sur le champ de Yibal, en Oman, et de Rabi-Kounga, au Gabon, pourrait être un exemple défavorable, car l'extrapolation du rapide déclin produit par les puits horizontaux semble conduire à des valeurs inférieures aux estimations annoncées (notamment par l'IFP en mai 2005), malgré une campagne de forages ad-

11. La capacité de fixer la production et les prix du pétrole fut atteinte pour une première fois en 1928 avec les accords d'Achnacarry entre les « Sept Sœurs », à savoir les grandes multinationales pétrolières (Exxon, Texaco, BP, Shell, Gulf, Standard Oil et Mobil Oil), formant de fait un oligopole (NDLR).

Graphique 18 — Déclin de la production de Rabi-Kounga (Gabon) 1989-2004



*PSA : Accord de partage de production entre plusieurs compagnies.

ditionnels (*infill drilling*). Il faut comparer le déclin accéléré de Rabi (graphique 18) à celui de Forties (graphique 13)

Confusions ou espérances : les schistes bitumineux

Les schistes bitumineux ne sont ni des schistes ni du bitume, mais des marnes avec du kérogène immature qui doit être chauffé à 600°C pour générer du pétrole. En fait, ils sont classés par

l'USDOE et l'AIE dans les lignites. La majorité des schistes est brûlée dans des centrales ou des cimenteries. Ils ne doivent pas être confondus avec les sables bitumineux, qui représentent l'autre bout de l'évolution géologique, lorsque le pétrole est dégradé. C'est cependant ce que font beaucoup de personnalités parlant du pétrole (Louis Schweitzer, de Renault, lors du « Panorama 2005 » de l'IFP ; Jean-Marie Chevalier sur la chaîne de télévision TV5 dans l'émission « La planète des autres » du 8 mai 2005, quand il parle des schistes du Canada).

Les schistes ont un long passé de production : en France depuis 1837 (mines d'Autun qui ont été fermées en 1957), en Écosse (1850-1963), en Australie (1865-1952, 1998-2004), au Brésil (1881-1900, 1941-1957 et depuis 1972), en Estonie (depuis 1921), en Suède (1921-1965), en Suisse (1921-1935), en Espagne (1922-1966), en Chine Manchourie (depuis 1929), en Afrique du Sud (1935-1960). Le pic de cette production est arrivé en 1980 à 50 millions de tonnes par an et l'on assiste, depuis, à un déclin symétrique (courbe de Hubbert).

Il est difficile de rassembler les données de production (en volume comme en poids) des schistes et de l'huile de schistes. Il y a de larges différences entre les pourcentages en réserves et en production, car les pays pauvres en énergie ont développé leurs uniques ressources. L'huile de schistes a plafonné vers 1965 avec une production de 25 000 b/j.

Les États-Unis possèdent les plus grandes ressources (estimations variant depuis 1973 entre 61 % et 78 % du total mondial). Le deuxième pays, pour les ressources, est, selon les auteurs, le Brésil ou la Russie, mais en 2005,

l'USDOE y a ajouté la Jordanie et le Maroc. Le producteur le plus important en volume de roches est l'Estonie, mais pour entrer dans l'Union européenne, l'Estonie a promis de réduire fortement la production des schistes pour s'arrêter vers 2030, afin de diminuer la pollution associée qui est très importante. La production cumulée, de l'ordre de 1,5 Gt, a fourni l'équivalent de 1,5 Gtep (environ 0,15 % de la production totale cumulée de pétrole à ce jour). Durant le choc pétrolier de 1973, de nombreux sites pilotes ont été construits aux États-Unis, suscitant la création de nouvelles villes, au prix de milliards de dollars US, pour produire quelques millions de barils de pétrole.

Tableau 4 — Part de réserves et production de schistes en 2002 (en %)

	Production	Réserves
Estonie	48	0,5
Brésil	27	2,5
China	17	0,5
Australie	8	1,0
États-Unis	0	78,0
Russie	0	7,0
Jordanie	0	1,0
France	0	0,2
Monde	100	100,0

Compilation de données par Jean Laherrère.

On décrit les États-Unis comme ayant des ressources de 2 000 Gb (surtout dans les *Green River oil shales*) sur les 2 600 Gb de ressources mondiales d'huile de schistes¹². Le dernier site pilote a été le *Stuart oil shale* (2,6 Gb de réserves), en Australie, avec mine en surface et traitement dans l'Alberta Taciuk Processor, construit et financé par le canadien Suncor, suivant sa technologie des sables bitumineux d'Athabasca. Le développement était en trois phases, prévues pour passer de 4 500 à 200 000 b/j. Mais la phase 1 de 4 500 b/j n'a même pas été atteinte : Suncor s'est retiré en 2001 et les partenaires australiens, bien que n'ayant à supporter que les coûts d'exploitation, sont tombés en faillite. L'usine a fermé en 2004. Cet exemple est révélateur, car on parle de coût économique alors qu'en réalité, il faudrait plutôt parler de bilan énergétique. De plus, les problèmes d'environnement semblent insurmontables en mine.

Seuls les projets *in situ* continuent, notamment celui de Shell (ICP ou *Mahogany Research Project*, dans le bassin de Piceance dans les Rocheuses). Depuis l'année 2000, on chauffe la roche dans des puits avec des résistances électriques et après plusieurs années de chauffage, l'huile coule dans des puits voisins. Pour empêcher l'eau de venir perturber le chauffage, les roches aux alentours sont congelées. Les médias disent que la production, occupant 50 personnes, est de 10 b/j avec une note d'électricité de 2 000 dollars US par jour. Shell estime qu'on ne pourra décider si le projet est « commercial » avant 2008. Dans le cas de décision positive, la construction d'un petit projet commercial serait lancée en 2010.

12. USDOE. *Strategic Significance of America's Oil Shale Resource*. Washington D.C. : rapport de l'USDOE, mars 2004.

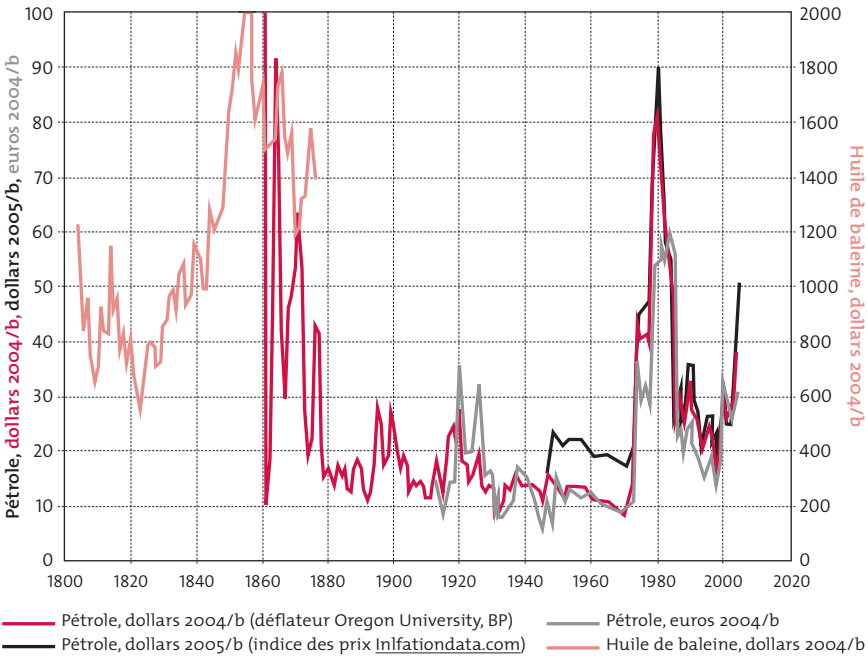
Chevron pense que le bilan énergétique est négatif. Guy Caruso, patron de l'AIE / USDOE, a déclaré le 13 juin 2005 qu'aucune technologie économique n'existe et qu'elle est peu probable avant plusieurs décennies. Les schistes bitumineux ont donc tout à la fois un passé décevant et un futur très incertain.

L'influence du prix du brut

Il est intéressant de comparer le prix de l'huile de baleine aux États-Unis avec celui du pétrole en dollars US et euros d'aujourd'hui. Son prix a culminé en 1855 à 2 000 dollars US le baril (valeur 2004). En 1875, ce prix était 30 fois plus élevé que celui du pétrole.

On peut noter que le déclenchement de l'exploration et de la production pétrolière à un stade industriel est bien corrélé à la raréfaction des baleines qui a entraîné la montée du prix de leur huile. Les investisseurs qui ont financé le « colonel » Drake en 1859 étaient donc fortement motivés économiquement. Ensuite, par le double jeu de la baisse de la demande en raison des prix élevés et de l'augmentation de la substitution, le prix de l'huile de baleine a décliné.

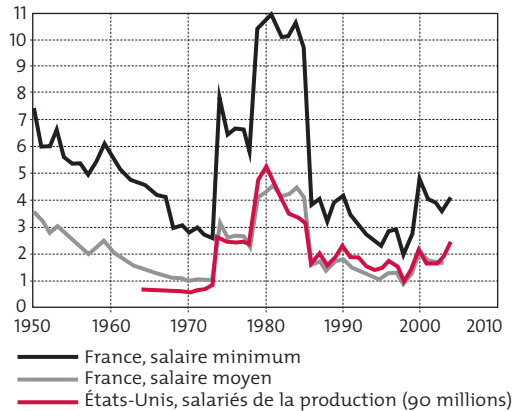
Graphique 19 — Prix de l'huile de baleine et du pétrole en dollars US 2004 et 2005, et euros 2004 (1800-2004)



Le prix du pétrole varie suivant sa qualité, car chaque brut d'un champ est différent. Parmi les bruts les plus souvent cotés, l'on trouve le panier OPEP, l'Arabian Light, le Dubaï, le Brent, le WTI (West Texas Intermediate). Il est amusant de constater que ces trois derniers bruts vont bientôt disparaître avec la fin prochaine des champs !

Le prix du pétrole a varié avec les grandes découvertes et les grands événements politiques. En prenant en compte l'inflation, il arrive tout juste aux sommets atteints au début de son histoire ou en 1980 ! En fait, même s'il semble élevé aujourd'hui, c'est peu de chose par rapport à 1980, exprimé en heures de travail. En France, il fallait travailler sept heures au salaire minimum en 1950 pour acheter un baril, trois heures en 1973, 11 heures en 1980, deux heures en 1998 et seulement quatre heures en 2004 (40 dollars US le baril), soit deux fois et demie moins qu'en 1980. Au salaire moyen horaire, il ne faut pas travailler plus en France qu'aux États-Unis pour acheter un baril, mais les Français travaillent 1 600 heures par an, contre 2 000 pour les Américains. Le prix du baril devrait être de 100 dollars US aujourd'hui pour un nombre d'heures de travail équivalent au niveau de 1980.

Graphique 20 — Nombre d'heures de travail nécessaire pour acheter un baril de pétrole au salaire minimum ou au salaire moyen, en France et aux États-Unis

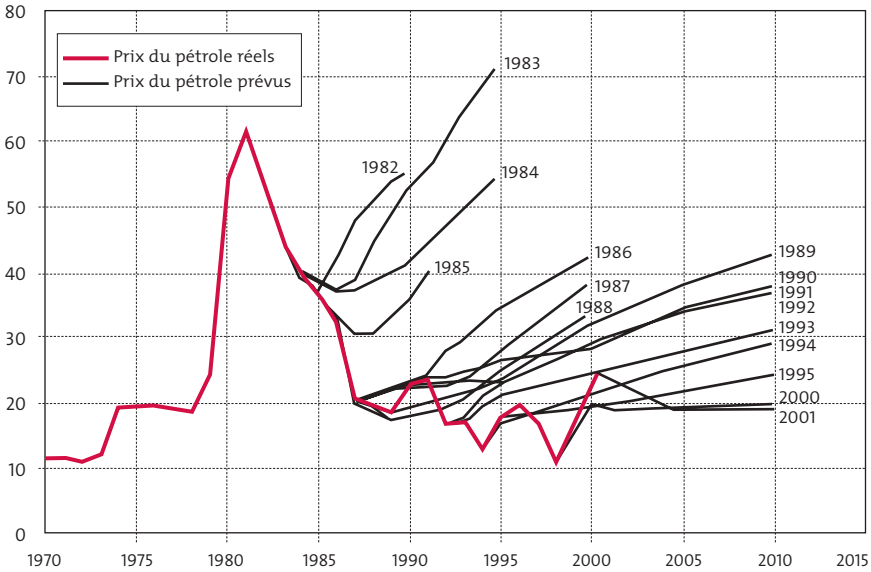


Je me refuse néanmoins à faire des prévisions sur les prix car le comportement des consommateurs est trop irrationnel.

Les prévisions du prix du pétrole sont toujours fausses. Personne en 2000 n'a prédit les 50 dollars US le baril atteints en 2004 ni les 70 dollars US le baril d'août 2005. L'USDOE et l'AIE, en 2004, prédisent 25 dollars US le baril pour 2030 ! Pierre-René Bauquis¹³ souhaite un nouveau choc pétrolier avec 100 dollars US le baril en 2020 pour permettre aux énergies renouvelables et aux économies d'énergie de résoudre le déficit en énergie, qui arrivera en

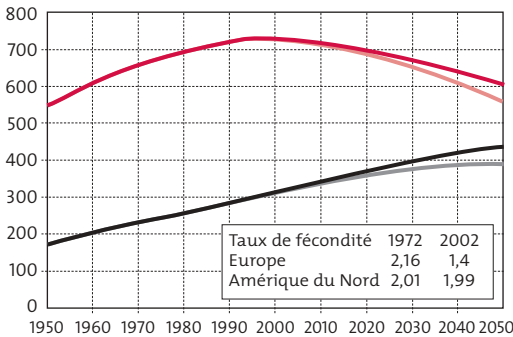
13. BAUQUIS Pierre-René. « Quelles énergies pour les transports au XXI^e siècle ? » *Les Cahiers de l'économie*, n° 55, octobre 2004, IFP (série Analyses et synthèses de l'École du pétrole et des moteurs).

Graphique 21 — Prévisions AIE / USDOE du prix du baril de pétrole brut (1982-2001) comparées à la réalité (en dollars US 1995)



Source : AIE / USDOE.

Graphique 22 — La population en Europe et Amérique du Nord 1950-2050 (prévisions 2004 des Nations unies, en millions)



- Europe, scénario médian, taux de fécondité (TF) 1,83
- Europe, scénario bas, TF 1,33
- Amérique du Nord, scénario médian, TF 1,85
- Amérique du Nord, scénario bas, TF 1,35

2050. Le grand changement est que l'OPEP, dominée par l'Arabie Saoudite, qui avait stabilisé les prix après le contre-choc de 1985 avec son mécanisme autour de 25 dollars US le baril, vient de s'apercevoir qu'un prix de 40-50 dollars US le baril ne fait pas baisser la demande, contrairement à ce qu'elle craignait, et 50 dollars US le baril est la nouvelle cible.

Population

Il faut ramener la consommation mondiale d'énergie à celle par habitant. La popula-

tion mondiale devrait culminer vers 2050 autour de huit milliards d'habitants. L'Europe va perdre 100 millions d'habitants à l'horizon 2050, alors que

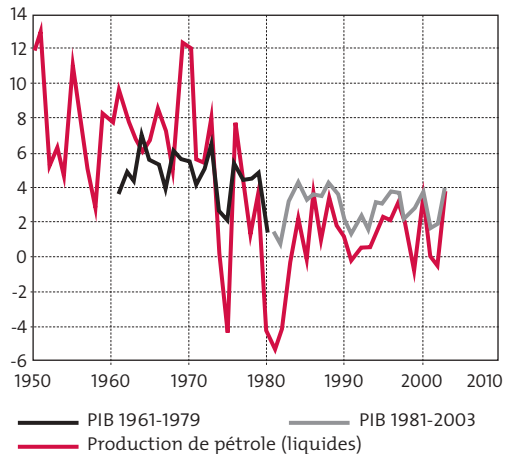
l'Amérique du Nord va en gagner 100 millions : il y a deux mondes et deux futurs.

Intensité énergétique, PIB et consommation de pétrole

Le PIB (produit intérieur brut), qui est pris à tort comme référence de la prospérité d'un pays alors qu'il ne représente que ses dépenses, varie depuis 50 ans comme la production de pétrole puisque sa croissance suit une courbe similaire. En raison de la décroissance progressive du dynamisme économique mondial, à laquelle s'ajoute le pic démographique mondial attendu vers 2050, il faut s'attendre à un pic du PIB un peu après 2050.

L'intensité énergétique, qui est le *ratio* consommation de pétrole/PIB, est polluée par la manipulation du PIB (facteur hédoniste aux États-Unis, statistiques fausses en Chine) et doit être regardée avec circonspection. Depuis 40 ans, le coût de l'énergie dans le PIB mondial est de l'ordre de 5 %, alors que sa contribution dans la productivité des facteurs représente 50 % (facteur capital 35 % et facteur travail 15 %) ¹⁴.

Graphique 23 — Croissance mondiale 1950-2003 du PIB et de la production de pétrole (liquides) (en %)



Il faut désormais se résoudre à payer l'énergie à son juste coût, à savoir le prix des énergies non fossiles.

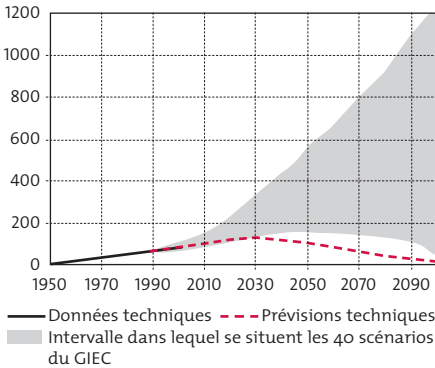
Les scénarios énergétiques du GIEC

Les 40 scénarios énergétiques (rédigés par l'IIASA, International Institute for Applied Systems Analysis) utilisés par le troisième rapport d'évaluation du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat),

14. KUMMEL Reiner, LINDENBERGER Dietmar, EICHHORN Wolfgang. « The Productive Power of Energy and Economic Evolution ». *Indian Journal of Applied Economics*, n° 3, 1998 ; AYRES Robert, AYRES Leslie, WARR Benjamin. « Exergy, Power and Work in the US Economy ». *INSEAD [ex-Institut européen d'administration des affaires] Working Papers*, n° 2002/52/EPSC/CMER, 2002.

en 2001, sur le changement climatique, sont académiques et irréalistes quand on compare leurs hypothèses aux données techniques. Les conclusions sont

Graphique 24 — Les scénarios du GIEC pour la consommation de gaz comparés à la prévision à partir des données techniques IIASA*



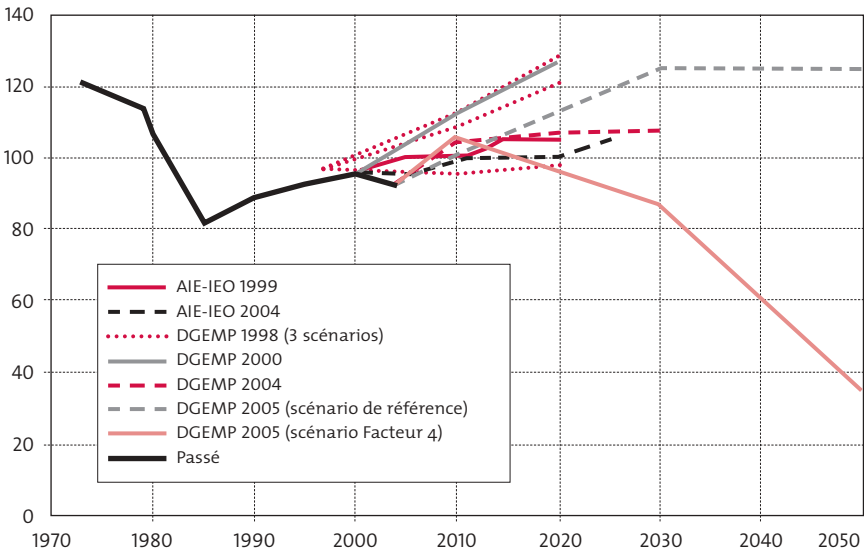
*Unité : exajoules (= 10¹⁸ joules ≈ Tcf, à ± 5 %)/an.

Source : LAHERRÈRE Jean. « Estimates of Oil Reserves ». IIASA International Energy Workshop, Laxenburg (Autriche), 19-21 juin 2001.

donc aussi discutables que les hypothèses. Le plus consternant est que le rapport 2007 (quatrième rapport d'évaluation) va utiliser les mêmes scénarios. À qui donc profite ce « catastrophisme » ? Aux scientifiques désireux de conserver leurs budgets ?

Mais personne dans les sphères officielles (ou dans les « *peer* » reviews car il n'y a manifestement pas de *peer* en matière de prévisions pétrolières, gazières ou charbonnières dans ces revues) n'a jamais osé critiquer ces scénarios énergétiques et ceux qui osent sont aussitôt exclus ! Le résultat en 2007 sera donc sans aucune valeur car, comme disent les Américains, « *garbage in, garbage out* » (GIGO, autrement dit : mau-

Graphique 25 — Consommation primaire de pétrole en France selon les scénarios DGEMP et USDOE / AIE (en Mtep/an)



vaises hypothèses à l'entrée, mauvais scénarios à la sortie). Par exemple, si on parle du gaz et non plus du seul pétrole, la fourchette des scénarios SRES (*Special Report on Emission Scenarios*) semble couvrir tous les futurs vraisemblablement possibles, alors que pourtant, malheureusement, les prévisions techniques sont en dehors de cette fourchette, comme c'est aussi le cas pour le pétrole et le charbon. Le graphique 24 a été présenté (de manière plus détaillée, avec les 40 scénarios de l'intervalle) à l'atelier international sur l'énergie de l'IIASA en 2001, comme beaucoup d'autres, mais ils ont été oubliés...

Même les estimations les plus optimistes ¹⁵ des réserves ultimes pour le gaz satisferaient à peine au scénario le plus bas. L'IIASA croit que les ressources de gaz n'ont pas de limite (production multipliée par plus de 10 en 2100) grâce aux hydrates de méthane. C'est du rêve car les experts (tels V. Soloviev et A. Milkov) reconnaissent maintenant que la production de ces hydrates hétérogènes et dispersés est très improbable.

Prévisions DGEMP pour la France et le monde

La DGEMP a publié en 2005 deux scénarios, dans son étude pour une perspective énergétique concernant la France ¹⁶. Le scénario dit de référence repose sur des hypothèses très optimistes : prix de 30 dollars US le baril de 2005 à 2030, réserves basées sur l'étude USGS, une croissance annuelle de 2,5 % de 2002 à 2030, un pic de population française en 2040, mais dès 2020 pour la population active (alors que la dernière prévision de l'Institut national de la statistique et des études économiques donne un pic de la population active pour 2006 !).

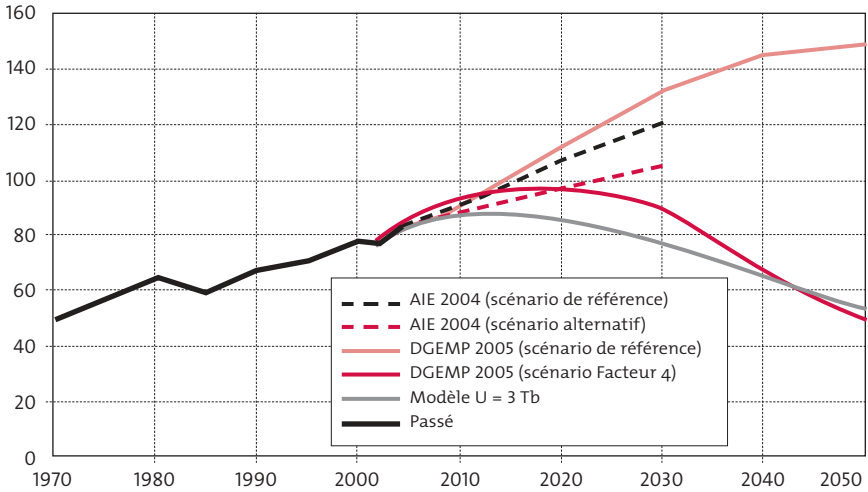
Le deuxième scénario appelé « Facteur 4 » a pour but de diviser par quatre les émissions de gaz à effet de serre. Les scénarios DGEMP de 1998 à 2005 pour la consommation de pétrole sont comparés dans le graphique 25 à celles de l'USDOE / AIE de 1999 et 2004. Le scénario de référence DGEMP 2005 est au-dessus des autres, comme les hypothèses le laissent supposer (voir également le graphique 26, page suivante).

La prévision DGEMP 2005 pour le pétrole mondial est bien supérieure à toutes les autres pour le scénario de référence, et le scénario « Facteur 4 » ressemble à ma prévision pour 2040, mais semble trop optimiste pour 2010 à 95 Mb/j (90 Mb/j, au mieux, selon mes calculs).

¹⁵. SALVADOR Amos. *Op. cit.*

¹⁶. Enerdata et LEPII (Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale) pour l'Observatoire de l'énergie / DGEMP.

Graphique 26 — Consommation mondiale de pétrole d'après DGEMP, AIE, et prévisions de réserves ultimes de 3 Tb (en Mb/j)



De ce qui précède, différents éléments de conclusion peuvent être soulignés. Ils sont résumés dans l'encadré ci-dessous.

EN BREF ET POUR CONCLURE

- Tout ce qui monte doit descendre. Une croissance constante est impossible dans un monde fini.
- Il n'y a pas de consensus sur les définitions.
- Publier des données est un acte politique et dépend de l'image que l'on veut présenter.
- Les données sont très douteuses ou absentes, notamment pour l'OPEP qui détient 80 % des réserves.
- Les données publiques sont politiques et divergent des données techniques qui sont confidentielles.
- Les réserves techniques sont incertaines vu la complexité géologique, et confidentielles vu la compétition.
- La hausse des prix du pétrole n'augmentera pas les réserves conventionnelles ni les découvertes.
- La technologie ne peut changer la géologie des réservoirs.

- Les schistes bitumineux et les hydrates sont un mythe, c'est le bilan énergétique qui importe et non le prix.
- La production imite la découverte avec un certain retard (5 à 50 ans), mais est contrainte par la demande.
- Les prévisions de la demande d'énergie ne reflètent que le désir politique d'une croissance constante.
- Toute prévision qui montre moins de passé que de futur est trompeuse.
- Le pic du pétrole peut être un plateau ondulé si l'économie mondiale entre en crise, ce qui est probable.
- La production mondiale de gaz culminera après celle de pétrole, mais la pénurie locale de gaz a déjà commencé en Amérique du Nord et en Europe, avant la pénurie de pétrole.
- Les ressources de charbon semblent surestimées et un bon inventaire est nécessaire.
- Les combustibles fossiles devraient culminer vers 2030.
- La consommation mondiale d'énergie par habitant, stable depuis 25 ans, le restera encore 25 ans avant de décliner.
- Aucune source d'énergie ne doit être éliminée. On aura besoin de toutes les diverses formes.
- Les scénarios de consommation de combustibles fossiles du troisième rapport du GIEC (2001) sur le climat sont irréalistes et le quatrième rapport de 2007 a décidé de garder les mêmes. C'est consternant !
- Il n'y a pas d'alternative aux liquides pour le transport. On passera du pétrole au pétrole synthétique.
- L'agriculture semble avoir atteint ses limites et elle ne pourra pas à la fois nourrir plus d'habitants et fournir des biocarburants en quantité suffisante pour remplacer le pétrole en déclin.
- Le coût de l'énergie ne représente que 5 % du PIB alors que sa contribution à la productivité globale des facteurs est d'environ 50 %. Des prix plus élevés sont donc possibles et supportables.
- Des prix plus élevés rendront compétitives les énergies non fossiles.
- Un changement de comportement des consommateurs est nécessaire pour économiser l'énergie et satisfaire les besoins futurs en énergie. Il ne se fera que par nécessité si le prix de l'énergie augmente. Il faut donc taxer l'énergie proportionnellement à son prix au nom de l'externalité « sécurité d'approvisionnement ».
- La croissance de la consommation ne peut continuer indéfiniment dans un monde fini où la population va culminer. Le « toujours plus » des Français doit être abandonné car la population active devrait plafonner en 2006.
- Il faut que cela aille vite, car ce que nous ne faisons pas nous-mêmes, la nature nous l'imposera, ce qui sera beaucoup plus douloureux et au seul avantage des pays producteurs (alors que les taxes, au moins, restent dans le pays consommateur et peuvent être recyclées).
- Autrement dit, baisser les taxes quand le prix augmente est une très mauvaise solution.
- Seul un prix élevé de l'énergie (aligné sur son vrai coût et incluant les risques extérieurs associés) peut amener les changements nécessaires pour inciter le consommateur à économiser et ne plus chercher à toujours consommer plus, se posant la question de ce qu'il va laisser à ses petits-enfants.
- Saint-Exupéry a écrit : « nous n'héritons pas la Terre de nos parents, nous l'empruntons à nos enfants ».

J.L.

VIGIE

SYSTÈME DE VEILLE MUTUALISÉE SUR L'ÉVOLUTION DE L'ENVIRONNEMENT STRATÉGIQUE DES ENTREPRISES ET DES ORGANISATIONS

POURQUOI UN SYSTÈME DE VEILLE ?

Il n'existe guère d'entreprises ou d'organisations qui puissent, chacune pour son propre compte effectuer le travail pourtant indispensable de compréhension de son environnement extérieur. L'association *Futuribles International* a donc organisé un « système de veille mutualisée sur l'environnement stratégique des entreprises et des organisations » articulable avec leurs préoccupations stratégiques propres.

OBJECTIFS DU SYSTÈME DE VEILLE MUTUALISÉE

- Analyser les mutations du contexte extérieur des entreprises et des organisations, en mutualisant les frais et les bénéfices d'une telle opération.
- Enrichir la simple observation de tendances par des analyses approfondies, grâce à l'expérience et aux compétences du groupe *Futuribles* qui mobilise sur ce projet une équipe permanente et son réseau d'experts internationaux.
- Veiller à l'appropriation des analyses issues du système de veille par les organisations participantes, grâce à des procédures d'accompagnement orchestrées par le groupe *Futuribles*.
- Grâce à ce dispositif, favoriser chez les partenaires une anticipation des évolutions du contexte extérieur qui puisse clarifier les enjeux de leurs décisions stratégiques.

PRODUITS ET SERVICES

- « Vigie Info », site Internet alimenté en flux continu, joue le rôle de service permanent de veille.
- Les notes d'alerte, documents de 4 à 6 pages, portent sur des tendances lourdes, des facteurs de discontinuité et de rupture.
- Les notes de synthèse traitent des enjeux particulièrement importants sur lesquels il s'avère nécessaire de procéder à une enquête plus approfondie.
- Le rapport annuel de synthèse brosse un panorama des tendances lourdes et émergentes d'évolution de l'environnement stratégique des entreprises et des organisations à l'horizon des 5, 10 et 20 prochaines années.
- La base de connaissances regroupe ces différents produits et contient des documents sources qui permettent d'enrichir les analyses.
- La constitution de sous-groupes de travail permet de développer la fonction de veille au plus près des préoccupations de leurs membres.
- Les réunions périodiques de travail permettent un bilan critique régulier de la pertinence des tendances et facteurs de discontinuité analysés, et la définition commune des grandes orientations de la veille.

SOUSCRIPTION

La souscription annuelle, hors conditions particulières, est de 14 000 euros hors taxes (soit 16 744 euros TTC dont TVA à 19,6 % = 2 744 euros).

Contact et renseignements : François de Jouvenel
E-mail : fjouvenel@futuribles.com - tél. : 33 (0)1 53 63 37 77

Albert Bressand ¹

Les scénarios globaux de Shell

PRODUCTION D'HYDROCARBURES, SÉCURITÉ ÉNERGÉTIQUE ET ÉCONOMIE DU CARBONE

Les compagnies pétrolières sont parmi les premières concernées par l'avenir des ressources en hydrocarbures. À ce titre, elles s'efforcent d'anticiper les évolutions à venir et de s'y préparer, à l'image de Shell qui, depuis les années 1970, élabore des scénarios énergétiques. Albert Bressand a coordonné, pour Shell, le dernier travail prospectif à l'horizon 2025, dans lequel ont été présentés divers scénarios dits « globaux », destinés à envisager les évolutions et ruptures possibles en matière énergétique.

Rappelant d'abord le débat (toujours d'actualité) sur le risque de pénurie de ressources (pic de Hubbert), il souligne l'importance de certains facteurs de discontinuité, trop souvent négligés : la possible fin du découplage énergie-croissance ; l'impact de plus en plus marqué du changement climatique dans le domaine des politiques énergétiques ; le rôle majeur de la politique et des enjeux nationaux (notamment au travers de la recherche de la sécurité énergétique). C'est l'occasion pour Albert Bressand de dresser un panorama assez exhaustif des tenants et aboutissants du débat (aspects techniques, géopolitiques : États-Unis, Chine, Russie, Inde, Moyen-Orient...).

Enfin, l'auteur résume les trois scénarios globaux de Shell à l'horizon 2025, articulés autour d'un triangle de forces (sécurité, efficacité et cohésion sociale), visant à approfondir l'analyse de Hubbert en l'adaptant au contexte actuel. Il est en effet essentiel, selon lui, pour avoir une image fiable des perspectives énergétiques, de prendre en consi-

1. Docteur en économie politique (Harvard), ingénieur général des Ponts et Chaussées, l'auteur s'exprime ici comme vice-président du département Global Business Environment de Royal Dutch Shell.

dération — outre les aspects géologiques et la demande mondiale — les conditions de l'investissement, les politiques réglementaires et fiscales, les politiques environnementales et les relations internationales, tant entre producteurs et consommateurs qu'entre grandes puissances.

S.D.

La scène énergétique est marquée, depuis le début de la décennie, par une triple discontinuité économique, environnementale et politique, qui vient aviver l'inquiétude quant au moment où les réserves d'hydrocarbures encore disponibles ne permettront plus à la production de croître et de faire face à l'accroissement de la demande. Les trois discontinuités ont trait, respectivement, au contenu plus élevé en énergie de la croissance économique contemporaine, aux effets du réchauffement de la planète et aux préoccupations de « sécurité énergétique ». L'inquiétude sur l'épuisement des ressources en hydrocarbures renvoie à un débat plus ancien connu sous le nom de « pic de Hubbert ». Les succès enregistrés en mer du Nord, dans le golfe du Mexique et en Russie l'avaient relégué au second plan dans les années 1990 ; à l'inverse, la « triple discontinuité » et les prix élevés du pétrole et du gaz lui confèrent une nouvelle acuité.

Dans une première partie, nous situerons dans son contexte le débat sur « la fin du pétrole » et sur le phénomène dit du pic de Hubbert. Nous organiserons ensuite nos ré-

flexions autour de la triple discontinuité qui transforme les conditions dans lesquelles l'énergie est produite et consommée. Le type de technologie que les entreprises et les États sont incités à développer est évidemment une variable clef, mais cela au sein d'un système qui est à la foi énergétique, économique, géopolitique et social. Enfin, nous présenterons une mise en perspective de ces diverses tendances autour des nouveaux scénarios globaux préparés au sein de Shell ².

L'intérêt d'une application de la méthode des scénarios, méthode dont Shell a été le pionnier sous l'impulsion de Pierre Wack ³, voici un tiers de siècle, et que j'ai eu récemment l'occasion de moderniser et d'adapter, est triple. D'une part, les scénarios protègent contre les certitudes en invitant à réfléchir aux discontinuités possibles ; d'autre part, ils permettent d'envisager sans *a priori* l'ensemble des manières dont une évolution à la fois importante et incertaine (*critical uncertainty*) peut se résoudre ; enfin, ils ont un intérêt tout particulier pour faciliter la réflexion sur les interactions entre des variables qualitativement différentes comme celles du progrès technique,

2. BRESSAND Albert (sous la dir. de). *The Shell Global Scenarios to 2025: Our Business Environment, Trends, Trade-offs and Choices*. Washington D.C. : Institute for International Economics, 2005 (disponible sur le site Internet www.amazon.com).

3. Voir WACK Pierre. « La planification par scénarios ». *Futuribles*, n° 99, mai 1986, pp. 3-26.

des politiques économiques, des tensions internationales et de préoccupations environnementales plus ou moins partagées... Or, précisément, on assiste aujourd'hui sur les marchés de l'énergie à une accumulation de discontinuités et d'incertitudes critiques, au confluent d'évolutions qualitativement différentes.

Le pic de Hubbert ou les pièges de la fausse simplicité

Géologue travaillant pour Shell Oil, King Hubbert avait prédit en 1956 que la production pétrolière des 48 États continentaux des États-Unis atteindrait un pic puis déclinerait à partir de la décennie 1970 ⁴. La réalité ne s'est écartée de cette prévision qu'en raison de l'augmentation du taux de récupération et du décalage de croissance de la consommation induit par les chocs pétroliers. Un courant de pensée important extrapole aujourd'hui ce raisonnement à l'échelle de la planète pour annoncer le déclin de la production d'hydrocarbures.

Sur le caractère fini des ressources et sur le fait qu'un pic sera atteint dans l'avenir, tous peuvent s'accorder. La vraie question porte sur l'horizon et sur ce point, les mêmes données conduisent les optimistes à n'envisager ce pic qu'à l'horizon

2040 au plus tôt (analyse de l'US Geological Survey) alors que les pessimistes, autour de Colin Campbell, le voient dès 2015 ⁵. Au-delà de ces évaluations différentes, ce débat néglige des facteurs essentiels. Tout d'abord, un raisonnement de pur géologue suppose que l'on puisse réduire la problématique à celle d'une demande et d'une offre s'exprimant à conditions inchangées, et que la nature de la ressource reste elle aussi inchangée. De plus, l'évolution de l'offre et la nature de la demande dépendent des investissements consentis ainsi que du contexte politique, réglementaire, fiscal et géopolitique. L'intérêt de nos scénarios est de poursuivre le débat essentiel amorcé par Hubbert, sans être prisonniers de continuités et de linéarités que Hubbert pouvait tenir pour acquises pour les questions plus limitées qu'il posait.

Tout d'abord, il est exact que les réserves prouvées n'augmentent plus qu'au rythme de 1 % par an contre 4,5 % dans les années 1980 et que les découvertes intervenues depuis 1999 ne compensent que 45 % des volumes consommés sur la même période. Mais il ne s'agit là que d'un élément d'un puzzle bien plus complexe. Même au niveau technique, on observera, tout d'abord, que le taux moyen de récupération a fortement augmenté et qu'une augmentation de 15 % de ce taux (actuellement de l'ordre de 35 %) ⁶ correspondrait à

4. Voir le graphique de la courbe de Hubbert, en p. 28 de ce numéro (NDLR).

5. CAMPBELL Colin. « Forecasting Global Oil Supply ». Londres : Submission to Her Majesty Government, Consultation on Energy Policy, 2003.

6. Pour le gaz, le taux actuel de récupération est souvent de l'ordre de 70 %, ce qui laisse une moindre marge. À l'inverse, la part des ressources gazières non consommées est plus faible que pour le pétrole et les incertitudes sur les réserves ultimes sans doute plus élevées.

l'ajout de 17 années de réserves mondiales au niveau actuel de consommation. De plus, l'opposition entre hydrocarbures conventionnels et non conventionnels est relative à un certain état de la technique. Il est possible aujourd'hui d'exploiter les sables bitumineux du Canada comme le font Shell ou Total, ou les pétroles très lourds des États-Unis et du Venezuela dans des conditions rentables pour un baril conventionnel à 35-40 dollars US. Un redémarrage de la production d'électricité nucléaire permettrait en outre de disposer de l'électricité nécessaire à la fluidisation des ressources souterraines non conventionnelles dans des conditions bien plus favorables pour ce qui est des émissions de CO₂ évoquées ci-dessous.

Jusqu'à ce point, l'analyse peut être conduite dans le langage des ingénieurs et géologues. Au-delà, à travers la grille de lecture de nos nouveaux scénarios globaux, nos analyses mettent l'accent sur la conjonction de trois discontinuités, et abordent la nature du cadre régissant l'investissement et la mise en valeur des ressources énergétiques.

La triple discontinuité

La fin du découplage énergie-croissance

Le premier choc pétrolier avait conduit à un certain « découplage » énergie-croissance. En termes plus techniques, le *ratio* entre croissance économique et croissance de la

consommation énergétique — *ratio* qui était précédemment proche de 1 — avait rapidement baissé pour s'approcher de 0,3 à la fin des années 1990. Or, les chiffres les plus récents indiquent une remontée très nette (presque un doublement si l'on se limite à l'année 2004, avec toutes les réserves que nous exprimerons) de cette intensité en énergie de la croissance mondiale, cela pour deux raisons au moins.

Tout d'abord, aux États-Unis, les gains d'efficacité se sont interrompus et l'on assiste même à une dégradation que l'on peut rapprocher, par exemple, de la vogue des *Sport Utility Vehicles* (SUVs) qu'une législation bon enfant persiste à assimiler aux camions et engins agricoles, et donc à soustraire aux normes de consommation CAFE ⁷.

Plus fondamentalement, mais aussi avec plus d'incertitude sur la fiabilité des données actuelles, le « recouplage » croissance-énergie reflète la part grandissante dans le PNB (produit national brut) et la croissance mondiale de la Chine et, encore loin derrière, de l'Inde. Inquiétante pour ce qui est des émissions de CO₂, voire des tensions sur les approvisionnements, cette seconde évolution s'inscrit dans le contexte très positif de l'élimination massive de la pauvreté qu'ont permis l'abandon du dogme marxiste et la mise en place d'une économie de marché en Chine. Jeune étudiant, j'avais eu la possibilité de visiter la Chine de la Révolution culturelle ; l'horizon de la consommation se limitait à

7. Corporate Average Fuel Economy : ce standard pour les voitures et les véhicules légers, établi par l'*Energy Policy Conservation Act* de 1975, fixe aux fabricants de voitures et véhicules légers un niveau moyen d'efficacité énergétique.

l'époque « aux quatre qui tournent et roulent » : la montre bracelet, la machine à coudre à pédales, le poste radio et surtout la bicyclette. L'adoption, à partir de 1979, des principes du marché sous l'impulsion de Deng Xiaoping a permis à plusieurs centaines de millions de Chinois des grandes villes côtières puis des campagnes d'aspirer à un niveau de vie qui pourrait, dans une vingtaine d'années, être équivalent à celui de la Thaïlande aujourd'hui. Les anciens pauvres aspirent notamment à rouler en automobile : nous nous attendons à ce que le parc chinois, qui est déjà très rapidement passé de quelques millions de véhicules officiels à 20 millions de véhicules de tourisme, se stabilise aux environs de 150 à 180 millions de véhicules d'ici deux décennies. Ce passage massif d'une économie rurale et informelle à une économie de type occidental se traduit par un appel très significatif aux ressources énergétiques de la planète, d'autant qu'il faut à la Chine 1,5 baril de pétrole pour produire 1 000 dollars US de PNB, soit le double de la moyenne mondiale. La Chine, qui était exportateur net de pétrole jusqu'en 1993, couvre depuis cette date pratiquement tout son surcroît de consommation par des importations : de fait, de 2001 à 2004, 40 % de l'accroissement de la demande mondiale en pétrole a correspondu à l'augmentation de la consommation chinoise.

La réussite de la Chine fait des émules et on peut observer une accélération de la libéralisation des marchés dans de nombreux pays en développement, à commencer par l'Inde qui constate que le PNB chinois, qui était équivalent au PNB indien au

début des années 1990, est aujourd'hui plus du double. Prise de court par l'envol chinois, mais avec les lenteurs qu'implique le jeu démocratique complexe des États, des castes et des bureaucraties, l'Inde s'est attelée une douzaine d'années plus tard au démantèlement progressif des règles économiques que Nehru avait empruntées au grand frère soviétique.

Dans la période récente, c'est sur les marchés des hydrocarbures que l'on a enregistré le plus nettement cette accélération de la consommation énergétique en provenance de Chine et des autres pays émergents. Plusieurs facteurs rendent difficile l'extrapolation à moyen terme des besoins chinois en hydrocarbures. Ainsi, en 2004, la Chine a dû importer en catastrophe une quantité importante de diesel pour répondre à une pénurie d'électricité qui disparaîtra lorsque les centrales hydrauliques, à charbon et à gaz en construction seront en activité. Inquiète pour sa sécurité, la Chine a également importé, malgré les prix élevés, afin de commencer à constituer une réserve pétrolière stratégique sur le modèle de celles des pays membres de l'Agence internationale de l'énergie (AIE). En outre, la Chine dispose de ressources en charbon considérables et va s'efforcer de moderniser ses mines et ses réseaux de transport ferroviaires pour que l'utilisation du charbon ne soit pas synonyme de pollution locale extrême et d'engorgement des réseaux de transport. La Chine s'intéresse aussi aux techniques permettant de gazéifier le charbon *in situ* et même, si la baisse des coûts se révèle suffisante, de transformer ce gaz

en hydrocarbures liquides comme cela se fait maintenant couramment à partir du gaz naturel. Shell est un partenaire important de la Chine dans ces réflexions sur le rôle futur des techniques connues sous le nom de GTL et CTL (*gas to liquid, coal to liquid*).

Ces incertitudes étant clairement notées, et en se gardant bien d'extrapoler les tendances de 2004, il n'en reste pas moins que l'accélération du développement des pays émergents va se traduire par une plus grande intensité énergétique de la croissance mondiale considérée dans son ensemble. La part la plus grande de ce surcroît ira au secteur de production d'électricité : nous vivons encore dans un monde où deux milliards d'êtres humains n'ont pas accès à l'électricité, et dans les pays riches, le développement des énergies renouvelables comme les éoliennes peine à compenser l'arrêt ou le démantèlement des programmes nucléaires. Au-delà de cette substitution d'éoliennes à une partie des centrales nucléaires, ce seront donc le gaz, le charbon et le pétrole qui répondront pour l'essentiel à cette demande considérable d'énergie supplémentaire.

Climat planétaire et météo politique

Le développement économique rapide de la planète dans la période actuelle se traduit par une hausse très significative des émissions de gaz polluants traditionnels comme les oxydes de soufre et d'azote, et de gaz carbonique (CO₂).

De nombreuses technologies sont au point pour réduire considérable-

ment les pollutions classiques. Ainsi, les pluies acides dont est aujourd'hui victime le Japon sous l'effet de vents transportant les effluves des centrales au charbon chinoises, sont susceptibles d'être réglées à travers, par exemple, le type de coopération qu'EDF (Électricité de France) a mise en place avec les autorités chinoises dans le cadre du programme *Beijing Blue Sky*.

Tout autre est la situation pour ce qui est des émissions de CO₂. Les techniques de séquestration sont complexes et coûteuses à mettre en œuvre, et ne se conçoivent bien que si elles sont étroitement intégrées au développement de champs pétroliers ou gaziers. Le recours croissant de la Chine au charbon présente à cet égard un défi considérable. Mais au-delà de ces exemples, c'est toute la dynamique de développement économique planétaire qui conduit aujourd'hui à la prise en compte des implications majeures que l'activité humaine peut avoir sur le climat.

Selon des travaux récents pour lesquels le débat contradictoire n'a pas encore été poussé à son terme, l'impact des activités humaines sur le climat semble perceptible depuis plus de six millénaires. Les « carottes de glace » extraites de la base de Vostok en Antarctique indiquent en effet un arrêt de la baisse naturelle des concentrations en CO₂ puis en méthane dans l'atmosphère terrestre, baisse entamée voici 10 000 ans, en conformité avec la baisse cyclique de l'ensoleillement de l'hémisphère telle qu'elle résulte des cycles astronomiques. Le moment où ces baisses naturelles s'interrompent correspond, pour le CO₂, au début du défrichage et des activités agricoles en Europe,

et pour le méthane, au début de l'inondation des plaines chinoises et indiennes pour la culture du riz. Le *Doomsday Book* anglais du XI^e siècle présente l'inventaire des terres anglaises demandé par Guillaume le Conquérant : il en ressort que la population, pourtant encore très limitée à cette époque, avait déjà défriché l'essentiel des forêts primaires. Jusqu'à la révolution industrielle, les activités humaines semblent avoir compensé la baisse des concentrations en gaz à effet de serre qui auraient résulté du jeu combiné des trois cycles astronomiques. En quelque sorte, les gaz à effet de serre ont été nos alliés pendant près de 6 000 ans, nous épargnant ce qui serait sinon, selon le chercheur William Ruddiman dont je m'inspire ici, le début d'un nouvel âge glaciaire. Mais aujourd'hui, les émissions de CO₂ l'emportent très largement sur les mouvements de fond naturels et la concentration en CO₂ atteint déjà un niveau supérieur de plus d'un tiers à ceux enregistrés au cours du million d'années écoulées. D'après les travaux des milliers de scientifiques coopérant au sein de l'International Panel on Climate Change (IPCC) ⁸, la limite de 550 parties de CO₂ par million (ppm) est celle au-delà de laquelle une déstabilisation massive des équilibres actuels est envisageable.

On constate déjà un recul rapide des zones à permafrost en Sibérie méridionale, phénomène qui devrait conduire à l'émission de quantités considérables de méthane résultant des décompositions végétales passées, pour l'instant bloqué sous

forme d'hydrates dans les sols gelés. Des phénomènes irréversibles sont concevables, avec des conséquences que l'ouragan Katrina et les feux de forêts des étés passés laissent hélas présager. Une étude du Livermore Laboratory rendue publique en novembre 2005 pousse l'analyse jusqu'à l'horizon 2300, où l'on peut estimer que l'ensemble des ressources en hydrocarbures connues auront été consommées. Les nouveaux modèles indiquent un réchauffement des zones polaires de l'ordre de 20° Celsius et une hausse du niveau des océans de l'ordre de sept mètres. On imagine la qualité des relations internationales lorsqu'une douzaine de milliards d'êtres humains chercheront à s'adapter à un tel monde. Or, nous ne sommes séparés de cette période que par quelques générations.

Pour toutes ces raisons, et indépendamment des courants politiques du moment, l'industrie énergétique doit aujourd'hui se concevoir comme productrice de deux grands types de produits et non plus d'un seul : à l'ère des hydrocarbures succède déjà celle de l'hydrogène et du carbone. L'industrie doit se préoccuper non seulement des atomes d'hydrogène, qui représentent la partie active des molécules d'hydrocarbures pour ce qui est des réactions productrices d'énergie, mais aussi des atomes de carbone qui constituent à ce jour les meilleurs porteurs des atomes d'hydrogène jusque dans les moteurs à explosion.

Le protocole de Kyoto (1997) représente à cet égard bien davantage

8. GIEC en français : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat.

que l'instrument juridique à portée encore limitée qu'il est pour le moment. Le mécanisme ETS (*Emission Trading Scheme*) permet le développement d'un marché sur les droits à émettre du gaz carbonique⁹. L'opinion publique a parfois du mal à comprendre comment l'un des moyens de réduire efficacement une pollution est de vendre des droits à polluer : sous les ambiguïtés du vocabulaire qui paraît ratifier et encourager la pollution, se place en effet un mécanisme de contrôle et de réduction équivalent à celui d'une taxe sur les émissions. À la différence d'une taxe calculée de manière bureaucratique avec des effets inutilement limités sur certaines entreprises et paralysants pour d'autres, l'existence d'un marché des droits d'émission permet que les entreprises qui auraient des difficultés considérables à réduire leurs émissions contribuent néanmoins à l'effort collectif en achetant des droits à celles capables de le faire davantage que ce qu'exigerait une loi.

Un tel marché permet de dégager un prix pour le droit à émettre. Ce prix peut, dès lors, être incorporé dans le calcul économique des agents pour prendre en compte les effets négatifs d'une pollution par le CO₂. Le fait que les États-Unis, l'Inde et la Chine ne participent pas au protocole de Kyoto a pour conséquence que le prix que dégage ce marché s'écarte très probablement vers le bas du prix optimal qui correspondrait à une régulation, par le marché, à l'échelle de la planète. Néan-

moins, même inférieur à l'optimum, ce prix rend visible le carbone au sein des chaînes industrielles. Un effet majeur du protocole de Kyoto est de nous avoir fait franchir ce que l'on pourrait appeler le « seuil cognitif » en faisant passer le coût des émissions de gaz à effet de serre (GES) de l'implicite à l'explicite. Même aux États-Unis, les analystes, les investisseurs et les organisations militant contre le réchauffement de la planète peuvent utiliser ces prix de la tonne de carbone émise dans leur dialogue avec les entreprises américaines. Au pays des *class-actions*, la perspective toujours possible d'actions judiciaires ultérieures est d'ailleurs de nature à améliorer la capacité d'écoute de ces dernières.

Peu avares en ironie, le gaz carbonique et les autres gaz à effet de serre ont pris rang parmi les productions marchandes, contribuant à cette « marchandisation du monde » dont la société française a la sourde appréhension, mais opposant cette même société aux États-Unis qui, pour les émissions de CO₂, préfèrent pour l'instant ne pas « marchandiser ». Seule différence par rapport à d'autres marchandises, les émissions de GES ont une valeur négative car les entreprises grosses productrices doivent acheter des droits à émettre. Cette entrée des GES dans la sphère marchande incite, d'une part, à en mesurer, rationaliser et donc limiter la décharge dans l'atmosphère et, d'autre part, à poursuivre les recherches sur les

9. Sur les permis d'émission, voir CRIQUI Patrick, MIMA Silvana, VIGUIER Laurent. « Les permis d'émission négociables. Enjeux et perspectives dans le cadre de la négociation sur le climat ». *Futuribles*, n° 255, juillet-août 2000, pp. 25-47 (NDLR).

technologies permettant d'accéder à l'hydrogène avec une moindre production de telles émissions voire, un jour encore lointain, autrement que sous forme d'hydrocarbures.

Incidentement, cette distinction systémique est bien différente d'une ode naïve à « l'ère de l'hydrogène ». Cette dernière semble en voie de remplacer dans l'imaginaire collectif l'ode aux énergies renouvelables au fur et à mesure que celles-ci se matérialisent sous la forme d'installations éoliennes ou solaires qui en révèlent les limites, les défauts ou tout simplement les désagréments. Nous sommes, en effet, déjà dans l'économie de l'hydrogène au sens qui vient d'être expliqué, et l'hydrogène qu'utilisent les prototypes de véhicules à hydrogène ne peut être obtenu qu'à partir d'hydrocarbures à moins que, clin d'œil ironique, on ne procède à l'hydrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine nucléaire...

Au total, c'est bien à une seconde discontinuité majeure que l'industrie énergétique est confrontée depuis le 16 février 2005, date d'entrée en vigueur du protocole de Kyoto.

L'impératif de sécurité énergétique

La troisième discontinuité — une préoccupation marquée pour la sécurité des approvisionnements énergétiques — est de nature plus diffuse puisqu'il s'agit davantage d'une préoccupation qui revient au premier plan après une décennie d'effacement que d'un bouleversement radical. Néanmoins, deux raisons conduisent à voir dans la sécurité énergétique l'une des composantes fondamentales de toute réflexion sur l'évolution

de l'industrie au cours des décennies à venir. La première est l'épuisement progressif des gisements d'hydrocarbures conventionnels sur les territoires des pays de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques) eux-mêmes. La seconde est celle de la prise de conscience par la Chine et par l'Inde de leur propre dépendance à l'égard des importations d'hydrocarbures.

Engrangeant les fruits des efforts d'exploration lancés après les chocs pétroliers des années 1970, la décennie 1990 avait vu des niveaux de production élevés sur le territoire contrôlé par les pays de l'OCDE, notamment le golfe du Mexique et la mer du Nord. Qui plus est, la vie de ces gisements politiquement sûrs a été prolongée grâce au progrès technique important réalisé par les entreprises pétrolières internationales en matière d'exploitation des gisements et de taux de récupération (les techniques de récupération assistée et la prolongation de la vie utile d'une plate-forme étant très coûteuses, la persistance de prix élevés devrait d'ailleurs ajouter plusieurs années de vie à bien des gisements mûrs).

Cependant, aucun budget d'exploration ni aucun progrès technique ne peut faire que les réserves en hydrocarbures conventionnels de ces régions sûres ne soient que modestes par rapport à celles des pays de l'OPEP (Organisation des pays exportateurs de pétrole). Les analystes s'accordent actuellement pour estimer que la production de pétrole et de gaz conventionnels en provenance des pays non-OPEP va atteindre son pic puis décliner au cours de la prochaine décennie, peut-être dès 2010. L'interrogation la plus forte porte

sur la Russie qui avait effectué un extraordinaire retour en hissant sa production à 9,3 Mb/j (millions de barils par jour). Toutefois, les conflits entre le Kremlin et l'entreprise Yukos ont marqué une pause qui peut constituer un fléchissement durable dans cette dynamique. Les responsables russes de l'énergie sont très loin d'avoir été unanimement convaincus du bien-fondé des techniques de production accélérées mises en œuvre par Yukos sous l'impulsion du Texan John Mac désormais déchu de ses fonctions. Pour beaucoup de responsables formés à l'école soviétique, les ressources nationales doivent être développées à un rythme dicté par les besoins de développement et de sécurité à long terme de la Russie, plutôt que par la maximisation des revenus sur le marché au cours de la période la plus courte possible. La Russie doit encore prendre des décisions essentielles pour la mise en valeur des ressources de la Sibérie orientale, et notamment décider quel type d'infrastructures (notamment de pipelines) sera construit avec des implications importantes pour les relations de la Russie avec la Chine¹⁰, le Japon et l'Union européenne. Tout en soulignant l'importance de ces incertitudes, il est assez généralement admis que la production russe plafonnera aux environs de 12 Mb/j, alors qu'elle a été au cours de la décennie écoulée l'élément le plus dynamique de la production hors OPEP.

Alors que l'OPEP fournit aujourd'hui seulement 30 % de la production mondiale de pétrole, sa part doit

passer à l'horizon de 20 ans dans la zone des 40 % à 45 %. Or, plusieurs pays importants de l'OPEP entretiennent avec la communauté internationale en général — ou avec les États-Unis en particulier — des relations difficiles. Tel est le cas de l'Iran et du Venezuela. De plus, il est inutile de souligner les aléas qui entourent le retour de la production irakienne à son niveau d'avant l'intervention des forces de la coalition : dans l'immédiat, l'Irak parvient difficilement à maintenir un niveau d'exportation de 1,5 Mb/j alors que sa production potentielle est souvent estimée à plus de 6 Mb/j. En outre, phénomène insuffisamment noté, la consommation intérieure des pays peu peuplés de l'OPEP augmente très rapidement. Le nombre de véhicules circulant au Qatar est ainsi passé de 40 000 à plus de 300 000 en une décennie et les usines de dessalement de l'eau de mer exigent la construction de nouvelles centrales thermiques au gaz, cela dans un contexte social où il paraît difficile de mettre fin à la gratuité de l'électricité et de l'eau pour les citoyens de nombreux pays du Golfe. Au total, la production des pays de l'OPEP va être l'objet d'une concurrence beaucoup plus intense que dans le passé récent, cela au moment où la Chine et l'Inde prennent conscience de l'ampleur des besoins en importation que va susciter leur niveau de croissance.

Comment s'étonner, dès lors, que de très nombreux pays fassent de la sécurité énergétique un aspect clef de leurs relations extérieures ? C'est

10. Voir PERELMAN Rémi. « L'énergie, talon d'Achille de la croissance chinoise » et « Chine-Russie : deux futurs possibles ». *Futuribles*, n° 296, avril 2004, pp. 33-41 et 43-55 (NDLR).

ainsi que l'Union européenne, dont la politique énergétique se résumait précédemment à un effort de libéralisation des marchés de l'électricité et du gaz, inclut la sécurité énergétique au rang de ses objectifs fondamentaux depuis le projet de directive de 2002. Les États-Unis poursuivent une stratégie délibérée de développement des flux d'importation de pétrole et de gaz en provenance de « l'hémisphère » (Canada, Mexique, Amérique du Sud et Afrique de l'Ouest).

Nouveaux venus au premier rang des acteurs de la mondialisation, la Chine et l'Inde hésitent encore sur la manière d'assurer leur sécurité énergétique. Pour certains dirigeants chinois, il apparaît encore naturel de définir une telle sécurité comme un prolongement du type de contrôle qu'un pays peut exercer sur ses propres ressources : on voit ainsi la Chine jouer un rôle très direct dans le développement des ressources énergétiques du Soudan et de l'Iran, d'une manière qui lui assure un certain degré d'exclusivité sur ces ressources. On estime qu'au Soudan, pas moins de 4 000 militaires chinois sont déployés de manière relativement discrète pour garantir la sécurité des opérateurs chinois et des installations énergétiques soudanaises. Toutefois, un second courant de pensée a conscience du caractère limité des ressources auxquelles la Chine peut ainsi garantir l'accès. On parle d'environ 300 000 b/j, volume qui reste marginal eu égard à une consommation chinoise qui dépasse déjà les 6,5 Mb/j.

Des économistes de banques chinoises que nous avons interrogés ne font pas mystère de ce que le surcoût que la Chine paye ainsi est disproportionné eu égard au niveau de sécurité atteint et que le marché international restera le meilleur garant d'un approvisionnement régulier du pays. Même dans ce cas, se pose néanmoins le problème de la sécurité maritime des approvisionnements de la Chine ; certains auteurs chinois, qui n'engagent évidemment qu'eux-mêmes, n'hésitent pas à évoquer la nécessité pour la Chine d'être en mesure de protéger les lignes maritimes essentielles comme le font les États-Unis et, le cas échéant, de répondre à la rupture de ces lignes d'approvisionnement par une action similaire sur les approvisionnements des États-Unis. On observera que la Chine est en passe d'aider le Pakistan à aménager un port en eau profonde à Gwadar¹¹, et discute de facilités navales et de pipelines avec la Birmanie. Le moment viendra probablement où la Chine souhaitera se doter d'une marine de haute mer.

L'Inde, pour sa part, adopte une approche beaucoup plus régionale dans laquelle les relations avec l'Iran jouent un rôle particulier, ne serait-ce qu'en raison du contre-poids que l'Iran peut offrir face au Pakistan. Deux projets concurrents sont actuellement à l'étude : un projet de pipeline sous-marin permettant à l'Inde de recevoir du gaz iranien sans transiter par le Pakistan ; un projet de gazoduc terrestre amenant le gaz iranien jusqu'aux zones

11. Voir PERELMAN Rémi. « Le collier de perles. Gwadar ou la "stratégie chinoise du collier de perles" ». *Futuribles*, n° 309, juin 2005, pp. 21-27 (NDLR).

de consommation pakistanaises qui sont situées le long de la frontière avec l'Inde, et en Inde elle-même, est officiellement sur le tapis depuis le réchauffement des relations indo-pakistanaises d'avril 2005. Toutefois, on peut estimer que l'Inde restera réticente à traduire un tel projet dans les faits en raison du degré de contrôle qu'il donnerait au gouvernement pakistanais ou aux groupes incontrôlables du Baloutchistan. En outre, ces deux projets se heurtent à une opposition résolue des États-Unis.

Au total, l'impératif de sécurité énergétique, passé au second plan dans les années 1990, est revenu au tout premier rang des préoccupations des pays occidentaux et des grands pays émergents sous l'effet conjugué des évolutions économiques, du retour en force de l'OPEP et, bien sûr, du terrorisme et de la guerre en Irak. La question, comme nous allons le montrer, est de savoir de quelle manière ces États répondront à cet impératif de sécu-

rité énergétique puisqu'une telle réponse peut combiner une logique classique d'investissement, l'action diplomatique et parfois même la force militaire.

On ne peut toutefois pousser plus loin l'analyse sans devoir replacer les considérations particulières comme celles de la sécurité énergétique dans un cadre plus large qui est tout simplement celui de l'état économique et politique de la planète. D'où l'utilité des scénarios.

Les scénarios globaux 2025

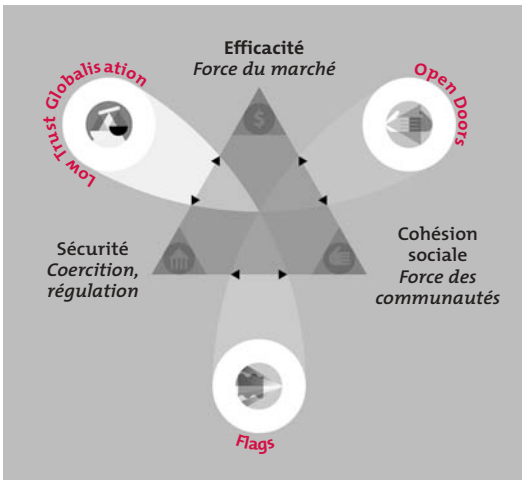
Nature et objectifs des scénarios Shell

Le terme scénario a été emprunté au théâtre et à l'opéra italien par Pierre Wack au début des années 1970, tout d'abord pour décrire les différentes manières dont les marchés de l'énergie étaient susceptibles d'évoluer. Cet outil a notamment aidé Shell à percevoir plus rapidement que d'autres l'approche des

premiers chocs pétroliers et à en tirer différentes implications pour l'évolution de ses activités. Vers la fin des années 1980, l'horizon de ces scénarios s'est élargi à l'ensemble des évolutions susceptibles d'influencer les activités du groupe, que ce soit dans les sociétés consommatrices où Shell est fournisseur de produits pétroliers pour le grand public ou dans les pays producteurs.

En pratique, il s'agit d'un outil d'aide à la décision élaboré pour le groupe par

Les scénarios de Shell à l'horizon 2025



le département que je dirige actuellement : celui-ci est utilisé par le conseil d'administration et les dirigeants pour identifier les grands risques et opportunités, et par les directeurs des divers « Shell Businesses » ou les responsables des grands projets auxquels on demande d'évaluer les performances des investissements proposés dans chacun des scénarios globaux.

Soucieux de faciliter l'utilisation de ces scénarios à différents horizons temporels et dans des régions très diverses, j'ai procédé à une refonte de la méthodologie qui a conduit à proposer des scénarios analytiques alors qu'ils se présentaient jusqu'alors sous une forme narrative. Les cinq générations de scénarios qui s'étaient succédé de 1989 à 2001 avaient toutes pris la forme d'une paire de descriptions de deux « futurs alternatifs ». De tels couples de scénarios permettaient d'ouvrir l'esprit du lecteur sur les évolutions contrastées auxquelles il fallait être prêt à répondre. Néanmoins, nous savons tous que le monde ne sera jamais conforme à l'image que nous pouvons nous en faire aujourd'hui. Il m'a donc paru utile de placer les scénarios sur une carte beaucoup plus large de futurs possibles de manière à saisir notamment les dynamiques d'évolution d'un état du monde à un autre sans être limité aux scénarios eux-mêmes. C'est dans cet esprit que la structure désormais en place repose sur l'analyse d'un triangle de forces (*Trilemma Triangle*) et seulement dans un second temps sur l'identification de trois états d'équilibre possible entre ces forces à l'horizon de 20 ans. L'objet du présent article n'est pas de présenter

cette structure, si ce n'est en termes très généraux, et nous n'exposerons donc en détail que certaines indications pour l'analyse des trois discontinuités que nous venons de décrire.

Les trois scénarios globaux

Les deux événements majeurs de 2001, à savoir le 11 septembre et la faillite d'Enron, ont conduit à remettre en cause la vision traditionnelle de la sécurité nationale et la confiance dans le libre jeu des forces du marché. Le rôle de l'État comme garant de la sécurité, et comme force de régulation et de coercition, s'en est trouvé renforcé. C'est cette force que les scénarios 2005 de Shell ont adjointe aux deux forces prises en compte dans les générations précédentes de scénarios, à savoir les incitations du marché et la cohésion au sein des communautés. Chacune de ces forces a un objectif clair, à savoir, respectivement, la sécurité, l'efficacité et la cohésion sociale.

Toute société partage ces trois objectifs, mais nos scénarios étudient dans quelle mesure ils s'excluent mutuellement, au moins en partie, et conduisent à un ensemble de trois dilemmes — que nous avons baptisé *trilemma*. Chacun des scénarios explore une façon de résoudre ce *trilemma* et l'équilibre entre les différentes catégories d'acteurs qui pourrait en résulter à l'horizon 2025.

Le premier scénario, que nous avons baptisé *Low Trust Globalisation* (LTG), voit les forces du marché et la mondialisation freinées par le manque de confiance réciproque des acteurs et les craintes en termes de sécurité. Transparence est le maître

mot de ce scénario et le prix à payer pour regagner la confiance des investisseurs, mais aussi des consommateurs. L'État joue un rôle clef comme acteur majeur de la sécurité, mais aussi comme architecte des mesures pour restaurer la confiance et superviseur de leur mise en œuvre.

Dans le deuxième scénario, *Open Doors*, les forces du marché et la société civile jouent un rôle prépondérant. La double crise de la sécurité et de la confiance dans les marchés a été surmontée grâce à la mise en place d'un ensemble de mesures préventives et d'initiatives privées garantissant leur mise en œuvre. Les modes de gouvernance, tant au niveau national qu'au niveau mondial, sont hybrides et voient gouvernements, entreprises et organisations représentatives de la société civile combiner leur action.

Le dernier scénario, *Flags*, décrit un monde dans lequel les forces de fragmentation ont mis un terme à

l'évolution vers une société mondiale : il ne signifie pas forcément un retour brutal en arrière, mais un coup de frein dans la mesure où les craintes relatives à la sécurité, et des solidarités et loyautés fragmentées prennent le pas sur des objectifs d'efficacité économique. *Flags* voit certains pays revenir à certaines formes de protectionnisme et une logique de jeu à somme nulle s'installer dans la plupart des négociations internationales.

Points communs et différences entre les trois évolutions énergétiques à 2025

Nous avons travaillé avec Oxford Economic Forecasting pour analyser les perspectives de croissance économique dans chacune des grandes régions du monde pour chacun des trois scénarios globaux. En termes économiques, les différences sont assez frappantes puisque les taux de croissance mondiaux vont de 2,6 %

« Trilemmap » : les moyens d'assurer la sécurité énergétique			
Scénario	Mécanisme	Politiques de la demande	Politiques de l'offre
<i>LTG</i>	Diversification de l'offre Encouragement de l'innovation	Arrêt des subventions à l'importation Taxation des carburants et du carbone, taxes anti-congestion Rationnement d'urgence	Concentration sur les ressources nationales ou régionales Interconnexion des réseaux
<i>Open Doors</i>	Marchés ouverts Standards harmonisés Promotion de l'investissement international	Internalisation des coûts environnementaux dans les prix Pression des consommateurs en faveur du développement durable Véhicules hybrides	Dialogue consommateur / producteur pour gérer les stocks, économiser les capacités et promouvoir l'investissement Infrastructures internationales
<i>Flags</i>	Accords bilatéraux, indépendance	Taxation des carburants Économies d'énergie Régulations coercitives	Préférence pour les ressources nationales Relations ponctuelles

par an pour *Flags* à 3,8 % pour *Open Doors*. Il en résulte évidemment des niveaux de consommation énergétique fort différents puisque le produit intérieur brut mondial est de 40 % plus élevé, en 2025, dans *Open Doors* que dans *Flags*. Toutefois, les différences ne sont pas aussi nettes lorsque l'on passe à certains aspects de la scène énergétique, en témoigne l'exemple des énergies renouvelables.

On pourrait imaginer que les énergies renouvelables (hydraulique, éolienne, solaire, biomasse...) se développent beaucoup plus vite dans *Open Doors* puisque, d'une part, les besoins en énergie sont plus grands, le prix du pétrole plus élevé et le poids politique des organisations non gouvernementales plus fort. Or, nos chiffres, en valeurs absolues, sont pratiquement identiques dans les trois scénarios en 2025. La raison en est que le développement de ces énergies obéit à des logiques très différentes dans les trois cas. Dans *Open Doors*, ce sont les préoccupations environnementales et la hausse du prix de l'énergie qui sont déterminants : les prix reflètent, d'une part la rareté plus forte de l'énergie, et d'autre part le coût négatif pour la planète des hydrocarbures. D'où un développement très net de ces énergies. Mais dans *Flags*, on atteint presque le même niveau en volume par une voie différente : celle d'efforts délibérés pour réduire la dépendance énergétique en subventionnant autant que nécessaire les énergies nationales. Dans *Low Trust Globalisation*, c'est la logique de diversification et les efforts des gouvernements pour favoriser les biocarburants et l'innovation, qui

conduisent, par cette troisième voie, à des résultats très proches.

Plus généralement, ce que montrent nos scénarios est la nécessité de dépasser une comparaison simpliste entre demande mondiale d'énergie attendue et sources disponibles. L'industrie de l'énergie est à la fois l'une des plus globales de la planète (qui est capable de dire sous quels cieux a été produite l'essence qui est, à un moment donné, dans le réservoir d'une voiture ?) et l'une des industries les moins « mondialisées » pour ce qui est du rôle clef que jouent les facteurs de souveraineté. On pourrait dire que beaucoup des molécules dans un réservoir d'essence portent encore un petit drapeau qui renvoie à un espace national souverain avec lequel il a fallu négocier dans une perspective combinant objectifs nationaux, considérations politiques et logique de marché. En outre, l'industrie énergétique est éminemment politique, au sens fort du terme qui renvoie, selon l'étymologie grecque, à la vie de la cité, dans la mesure où elle met en jeu des considérations sur l'organisation du territoire, la hiérarchisation des modes de transport, la collecte de ressources fiscales par l'État, la protection de l'environnement ou la santé. C'est pour cela que la référence aux trois forces saisies dans le *Trilemma Triangle* nous paraît féconde pour dépasser la logique de Hubbert.

Comme l'a montré l'exemple des énergies renouvelables, la demande aussi bien que l'offre sont informées par un contexte politique, réglementaire et social aussi bien que par l'état des relations internationales. La notion même de sécurité énergétique a une signification fort diffé-

rente selon que l'on peut faire confiance au développement des investissements, et notamment des investissements en direction des pays de l'OPEP du Moyen-Orient, ou selon que l'industrie énergétique mondiale reste divisée entre des compagnies internationales et des compagnies nationales, dont seule une petite poignée est aujourd'hui en état de mobiliser les ressources techniques et financières nécessaires au développement des ressources de leur pays.

La manière dont les États pétroliers envisagent leur propre avenir dépend aussi d'un tel contexte. À des degrés divers, pratiquement tous ces États aspirent à utiliser leurs ressources pour diversifier leur économie et assurer des emplois à une population très souvent en forte expansion. Mais beaucoup de ces États pétroliers restent confrontés à ce que l'on appelle la malédiction pétrolière (*the resource curse*), observation qu'une étude récente du Fonds monétaire international résumait en disant que « ces États sont pauvres du fait même de leurs richesses en ressources ¹² ». Ceux d'entre eux qui parviennent à diversifier leur économie et à jeter les bases d'un développement dans la durée prennent en général leurs distances avec les approches nationalistes qui conservent, au contraire, toutes les faveurs de régimes condamnés à osciller entre l'autori-

tarisme et le populisme. Bien évidemment, l'évolution d'ensemble de la gouvernance mondiale, et tout particulièrement les réponses apportées à la crise du Moyen-Orient et à l'aspiration des Palestiniens à disposer de leur propre État, conditionnent les perceptions mutuelles et les politiques suivies.

Au total, l'application mécanique d'une approche comme celle dite du pic de Hubbert suppose implicitement un lien direct entre les ressources géologiques et la demande à satisfaire. Un tel schéma néglige les variables clefs que sont les conditions de l'investissement, les politiques réglementaires et fiscales, et les relations internationales tant entre producteurs et consommateurs qu'entre ces acteurs clefs que sont aujourd'hui les États-Unis, l'Union européenne, la Chine, la Russie et l'Inde. Le réchauffement climatique, non perçu à l'époque de Hubbert, apporte un autre niveau de complexité dont nos scénarios montrent bien qu'il renvoie lui aussi à des logiques économiques, politiques et de gouvernance qui gagnent à être appréhendées de manière cohérente avec le reste de l'analyse. Shell s'est efforcé d'aider à structurer la réflexion, en se réjouissant de toute occasion d'approfondir un débat qui nous concerne tous et dont dépend, à bien des égards, la paix et la prospérité du monde à venir.

12. BIRDSALL Nancy, SUBRAMANIAN Arvind. « Escaping the Oil Curse: Saving Iraq from its Oil ». *Foreign Affairs*, juillet-août 2004.

Patrick Criqui ¹

Effet de serre : quelques scénarios

STABILISER LES CONCENTRATIONS DE GAZ
À EFFET DE SERRE POUR PRÉSERVER
LE CLIMAT DE LA PLANÈTE

Patrick Criqui, expert en prospective énergie-environnement, rend compte dans cet article de divers scénarios réalisés ces dernières années s'agissant des perspectives énergétiques et des émissions mondiales de gaz à effet de serre. Ainsi qu'il le rappelle, « entre pression de la demande, contrainte amont sur les ressources et contrainte aval sur les émissions, la construction de scénarios énergétiques durables relève de la quadrature du cercle ».

Il résume ici divers scénarios parmi lesquels ceux du GIEC (Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat), ceux réalisés dans le cadre de l'étude Greenhouse Gas Reduction Pathways, ou encore les scénarios « Facteur 4 » (visant à diviser par quatre le volume d'émissions de gaz carbonique, en France notamment). Parmi ces scénarios, certains sont dits « sans politique » (ils ne se fixent pas d'objectif souhaitable) ; d'autres se fixent des objectifs chiffrés en termes de stabilisation voire de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Patrick Criqui les décrit en détail, montrant les enseignements que l'on peut en tirer dans chaque cas, les controverses qu'ils ont pu susciter et leurs implications possibles en termes d'action publique, notamment. Il montre enfin les politiques possibles pour favoriser l'avènement de scénarios « vertueux » (de stabilisation des émissions), dans le domaine des innovations technologiques, en matière d'incitations économiques et au plan structurel.

S.D.

1. Directeur de recherche au CNRS (Centre national de la recherche scientifique), LEPII-EPE (Laboratoire d'économie de la production et de l'intégration internationale, département Énergie et politiques de l'environnement), Grenoble.

L'article 2 de la convention cadre des Nations unies sur le changement climatique, élaborée en 1992 lors du sommet de la Terre à Rio, indique que son objectif ultime est de « stabiliser [...] les concentrations de gaz à effet de serre [GES] dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du système climatique ». Parallèlement, l'un des enseignements majeurs des rapports d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat² est que la stabilisation des concentrations imposera de ramener les émissions à environ la moitié de ce qu'elles sont aujourd'hui, ce niveau devant être atteint d'autant plus rapidement que l'objectif visé pour les concentrations stabilisées est faible. Pour les pays signataires de la convention, les politiques climatiques — qu'elles soient mises en œuvre dans un cadre national, régional ou mondial — doivent donc viser à faire baisser les niveaux d'émission, dans des proportions d'autant plus importantes que les émissions actuelles sont élevées.

Par ailleurs, la scène énergétique mondiale de la première moitié du XXI^e siècle sera dominée par l'émergence des nouvelles puissances économiques, la Chine et l'Asie du Sud-Est aujourd'hui, très bientôt l'Inde. Ces régions souhaitent légitimement que leur population dispose d'un meilleur « accès à l'énergie », afin de permettre la satisfaction des besoins élémentaires et, plus généralement, d'améliorer les conditions de vie. Ce phénomène entraîne déjà une rapide augmentation des consommations d'énergie, génératrice de tensions sur les marchés des hydrocarbures. La pression de la demande restera très vive, au moins jusqu'au milieu du siècle lorsque devrait intervenir la stabilisation de la population mondiale. Si, comme cela est probable, l'offre de pétrole et de gaz se trouve contrainte, alors la demande se reportera pour une large part sur le charbon, dont les ressources sont abondantes mais dont les impacts en matière d'émissions de GES sont particulièrement importants.

Entre pression de la demande, contrainte amont sur les ressources d'hydrocarbures et contrainte aval sur les émissions de GES, la construction de scénarios énergétiques durables relève bien aujourd'hui de la quadrature du cercle. Car il n'y a pas à attendre de solution miracle dans les 50 prochaines années, alors même qu'elles seront de plusieurs points de vue décisives. Cela rend l'exercice de prospective d'autant plus nécessaire : non seulement le secteur de l'énergie est vital pour l'économie mondiale, mais aussi ses constantes de temps — pour modifier les comportements ou introduire de nouvelles options technologiques — sont beaucoup plus longues que celles des technologies de la révolution de l'information. Les « chocs du futur » de l'énergie doivent donc être

2. GIEC, en anglais IPCC pour Intergovernmental Panel on Climate Change. Créé en 1988 par l'Organisation mondiale de la santé et l'Organisation météorologique mondiale, le GIEC constitue l'instance scientifique internationale en charge de rassembler et d'organiser les connaissances sur le changement climatique, au sein de trois groupes de travail : groupe 1, « Les éléments scientifiques » ; groupe 2, « Conséquences, adaptation et vulnérabilité » ; groupe 3, « Mesures d'atténuation », site Internet www.ipcc.ch.

anticipés, au risque de dommages irréversibles pour la planète et d'ajustements imposés et brutaux, porteurs de tensions sociales et de crises internationales.

De fait, le secteur de l'énergie reste l'un de ceux dans lesquels l'effort de prospective se maintient et les travaux sont multiples, qu'ils soient directement entrepris ou suscités par des administrations et organisations internationales (Agence internationale de l'énergie, Commission européenne, ministère français de l'Industrie, département de l'Énergie américain...), ou encore par des institutions professionnelles ou scientifiques internationales telles que la Conférence mondiale de l'énergie ou le GIEC. Les futurs énergétiques sont donc explorés et des consensus partiels apparaissent parfois. Cependant, les incertitudes demeurent quant aux tendances spontanées d'évolution du système énergétique mondial, quant à l'écart entre ces évolutions « sans politique » et les évolutions désirables, enfin quant aux moyens et politiques à mettre en œuvre pour combler cet écart.

Dans ce qui suit on présentera tour à tour : les scénarios élaborés dans le cadre du GIEC pour décrire le champ des possibles des scénarios « sans politique », puis les grandes lignes de « scénarios-objectif » permettant de sauvegarder le climat planétaire, enfin les politiques susceptibles d'enclencher la combinaison des changements de comportements et des innovations technologiques qui seront indispensables pour atteindre un développement énergétique durable ³.

Les scénarios « sans politique » : enseignements et controverses

Le *Rapport spécial du GIEC sur les scénarios d'émission* ⁴ a constitué un effort notable pour développer la prospective mondiale des émissions de GES et construire des images du futur cohérentes, tout en identifiant les principales incertitudes. L'étude s'est déroulée sur cinq ans (1995-2000), en parallèle à la préparation du troisième rapport d'évaluation du GIEC et il a permis d'analyser un grand nombre d'études, à partir des travaux de plusieurs équipes, avec des modèles différents mais un cadre d'hypothèses harmonisé. Une des idées premières et structurantes du RSSE fut qu'il était impossible d'identifier un scénario de base ou de référence « plus probable » que les autres. Ce parti pris méthodologique peut aisément se comprendre car l'avenir est « ouvert et multiple ». On verra cependant plus loin qu'il peut poser problème lorsqu'en vue de la décision politique, il s'agit de prendre la mesure des efforts à entreprendre.

3. Cet article reprend certains des éléments d'un rapport scientifique d'évaluation des scénarios d'émission, préparé pour l'organisation Greenpeace.

4. RSSE, en anglais SRES pour *Special Report on Emission Scenarios*, site Internet www.grida.no/climate/ipcc/emission.

Dans cette perspective des « références multiples » retenue par le RSSE, plusieurs familles de scénarios harmonisés ont donc été développées, après identification de quatre grandes forces motrices ou *drivers* : démographie, croissance économique, ressources énergétiques et technologie. Ces familles sont structurées par le croisement de deux jeux d'hypothèses socio-économiques contrastées : d'abord sur le primat de la croissance ou de l'environnement, puis sur la convergence ou la fragmentation des différentes régions du monde. La démarche conduit donc à quatre ensembles de scénarios (tableau 1). Enfin, pour le scénario de forte croissance avec convergence (famille A1), la prise en compte des ressources et des technologies énergétiques permet de construire trois variantes : intensive en énergies fossiles (A1FI), équilibré (A1B) et intensif en technologies sans carbone (A1T).

Tableau 1 — Typologie des scénarios du RSSE

	Convergence	Fragmentation
Croissance	A1 (A1FI, A1B, A1T)	A2
Environnement	B1	B2

Dans ces scénarios, l'association d'une plus faible croissance économique au choix de valeurs sociales plus en faveur de l'environnement pose question. La protection de l'environnement ne peut-elle être au contraire considérée à la fois comme créant de nouvelles opportunités de croissance à court terme et comme la condition d'une croissance soutenue sur le long terme ? Cette problématique n'est pas explicitement abordée par le RSSE, dont on peut considérer qu'il a croisé les deux jeux d'hypothèses afin, avant tout, d'ouvrir le champ des futurs, tout en considérant qu'une faible croissance serait plus acceptable socialement dans un monde privilégiant l'environnement.

À partir de la grille du RSSE, plus de 40 scénarios ont été simulés, reflétant non seulement l'incertitude sur les forces motrices et les paramètres, mais aussi la diversité des modèles et des modes de représentation de la réalité. Les six « scénarios marqueurs », élaborés chacun par une équipe précise, suffisent à faire apparaître une très large fourchette pour les principaux résultats : de B2 à A1FI, les émissions de CO₂ énergétique en 2100 varient de 3,8 à 30,3 GtC (gigatonnes de carbone) ; de B1 à A1FI, les émissions cumulées sur plus d'un siècle varient de 983 à 2 189 GtC (voir tableau 2, partie supérieure). L'écart est donc considérable : selon les hypothèses retenues les seuls scénarios « sans politique » pourraient conduire à des émissions cumulées sur le siècle allant du simple au double.

La décomposition des facteurs de la croissance des émissions à partir de l'« identité de Kaya » fait apparaître continuités, ruptures et valeurs extrêmes dans les éléments clefs des scénarios, et elle permet d'expliquer les différences dans les résultats. On peut ainsi identifier (en rouge dans le tableau 2) : la très forte croissance du PIB par habitant dans les scénarios A1 entre 2020 et 2050 ; le maintien de la croissance de la population au-delà de 2050 dans

Tableau 2 — les scénarios du RSSE, chiffres clefs et analyse par l'« identité de Kaya* »

		A1FI	A1 A1B	A1T	A2	B1	B2
Scénarios marqueurs du RSSE : les chiffres clefs							
Population (milliards)	1990	5,3					
	2020	7,6	7,4	7,6	8,2	7,6	7,6
	2050	8,7	8,7	8,7	11,3	8,7	9,3
	2100	7,1	7,1	7	15,1	7	10,4
Énergie primaire (Gtep)	1990	8,4					
	2020	15,9	16,9	15,4	14,2	14,4	13,5
	2050	34,1	32,1	28,9	23,1	19,3	20,7
	2100	49,3	53,0	48,1	40,9	12,2	32,3
Carbone énergie (Gtep)	1990	6					
	2020	11,2	12,1	10	11	10	9
	2050	23,1	16	12,3	16,5	11,7	11,2
	2100	30,3	13,1	4,3	28,9	5,2	3,8
Carbone total cumulé (Gtc)	1990-2100	2 189	1 499	1 068	1 862	983	1 164
Scénarios marqueurs du RSSE, analyse par l'« identité Kaya »							
tc Population (%)	1991-2020	1,2	1,1	1,2	1,5	1,2	1,2
	2021-2050	0,5	0,5	0,5	1,1	0,5	0,7
	2051-2100	- 0,4	- 0,4	- 0,4	0,6	- 0,4	0,2
+ tc PIB par habitant (%)	1991-2020	1,9	2,2	2,1	0,8	1,9	1,8
	2021-2050	3,4	3,4	3,6	1,2	2,7	1,9
	2051-2100	2,8	2,6	2,6	1,6	2,2	1,3
+ tc intensité énergétique du PIB (%)	1991-2020	- 0,9	- 0,9	- 1,3	- 0,5	- 1,3	- 1,4
	2021-2050	- 1,2	- 1,8	- 1,9	- 0,7	- 2,1	- 1,1
	2051-2100	- 1,6	- 1,1	- 1,1	- 1,0	- 2,6	- 0,6
+ tc intensité carbone de l'énergie (%)	1991-2020	- 0,1	0,0	- 0,3	0,3	- 0,1	- 0,2
	2021-2050	- 0,1	- 1,2	- 1,4	- 0,3	- 0,5	- 0,7
	2051-2100	- 0,2	- 1,4	- 3,1	0,0	- 0,7	- 3,0
= tc carbone énergie (%)	1991-2020	2,1	2,4	1,7	2,0	1,7	1,4
	2021-2050	2,4	0,9	0,7	1,4	0,5	0,7
	2051-2100	0,5	- 0,4	- 2,1	1,1	- 1,6	- 2,1
<p>*Yoichi Kaya, de l'université de Tokyo, a été le premier à proposer une décomposition de la variation des émissions de CO₂ en un produit simple de quatre variables clefs : la population (POP), le produit intérieur brut par tête (PIB/POP), l'intensité énergétique du PIB (ENE/PIB), et enfin l'intensité en CO₂ de l'approvisionnement énergétique : (CO₂/ENE). Le calcul est le suivant :</p> $CO_2 = (CO_2/ENE) \times (ENE/PIB) \times (PIB/POP) \times POP$ <p>On peut alors expliquer le taux de croissance (tc) des émissions comme la somme des taux de croissance des quatre grandes variables explicatives ainsi identifiées :</p> $tc(CO_2) = tc(CO_2/ENE) + tc(ENE/PIB) + tc(PIB/POP) + tc(POP) + \epsilon$ <p>Source : RSSE et calculs de l'auteur.</p>							

A2 ; la forte réduction de l'intensité énergétique du PIB dans B1 ; la très forte décarbonisation de l'énergie après 2050 dans A1T et B2...

Incontestablement, les scénarios du RSSE ont constitué une base solide et validée pour les travaux du troisième rapport d'évaluation du GIEC. Mais,

comme cela est normal et même constitutif de tout processus scientifique, ces scénarios ont été critiqués et ils ont même donné lieu à une véritable controverse, portant en particulier sur les hypothèses de croissance économique, avec la contestation à la fois du mode de mesure utilisé et des hypothèses retenues.

Il s'agit notamment de savoir si les PIB de chaque région doivent être mesurés au taux de change du marché, ou bien en tenant compte des différences structurelles de prix entre pays industriels et pays en développement, par un taux de change dit de « parité de pouvoir d'achat ». Ce débat est déjà ancien car on sait que pour les pays en développement, la mesure au taux de change du marché conduit à sous-estimer le niveau initial du PIB réel et, parallèlement, à surestimer sa croissance. Selon le rapport récent et très critique de la Chambre des lords britannique sur « l'économie du changement climatique ⁵ », la mesure du PIB au taux de change du marché dans les scénarios RSSE tendrait à surestimer la croissance mondiale et donc les niveaux d'émission dans les scénarios « sans politique » ; le risque climatique serait donc ainsi surévalué, à des fins de dramatisation du problème.

Dès 2003 et en réaction à une première vague de critiques, les principaux auteurs du RSSE avaient apporté un ensemble de réponses argumentées ⁶ et le procès qui est fait au RSSE d'incorporer des biais politiques systématiques est certainement mal fondé. De plus, à supposer qu'on la recherche, l'instrumentalisation des scénarios à des fins politiques serait un exercice délicat et ambivalent : faudrait-il de fait développer des scénarios « sans politique » qui amplifient le problème, pour montrer l'urgence d'une politique, mais alors on ne ferait qu'augmenter la difficulté apparente à atteindre ces objectifs ; ne faudrait-il pas au contraire minorer l'écart entre le développement spontané et le développement souhaitable du système, afin de suggérer que les bonnes politiques, visant des objectifs ambitieux seront aisément couronnées de succès ? Du point de vue même d'une hypothétique volonté de manipulation, la réponse ne serait pas évidente.

L'effort d'amélioration des scénarios doit donc être poursuivi, mais selon de véritables lignes de recherche, non sur la base de procès d'intention :

— Les difficultés soulevées par la mesure de la croissance sont réelles et devraient être approfondies, en mettant l'accent sur la nécessaire cohérence entre le mode de calcul adopté pour la croissance et les hypothèses d'évolution des intensités énergétiques.

5. SELECT COMMITTEE ON ECONOMIC AFFAIRS. *The Economics of Climate Change*. Londres : Chambre des lords, 2005, site Internet www.parliament.uk/parliamentary_committees/lords_economic_affairs.cfm.

6. NAKICENOVIC Nebojsa et alii. « IPCC SRES Revisited: a Response ». *Energy & Environment*, vol. 3, n° 2-3, 2003, site Internet www.iiasa.ac.at/Research/TNT/WEB/Publications/ipcc-sres-revisited/ipcc-sres-revisited.html.

— De même, l'effort d'amélioration des outils de modélisation et de scénarisation pour l'économie et l'énergie, doit à l'évidence être accentué, alors qu'aucune institution internationale ne fournit aujourd'hui d'analyse structurée sur la croissance économique mondiale à très long terme.

L'exercice RSSE a donc permis de mobiliser différentes ressources pour un exercice de prospective assurant une cohérence d'ensemble et une bonne organisation des résultats. Parmi les principaux, le GIEC souligne en particulier que des jeux d'hypothèses économiques proches peuvent conduire à des résultats très différenciés du point de vue des émissions cumulées (par exemple A1FI et A1T), alors qu'inversement des scénarios socio-économiques très dissemblables peuvent conduire à des résultats proches pour les émissions cumulées (B2 et A1T).

On touche ici un point fort mais aussi une limite de cet exercice. S'il est sans doute bon de faire apparaître les incertitudes, l'éclatement des résultats à la fin du processus fait que le message peut paraître très ambigu aux yeux des décideurs, qui sont censés prendre la mesure du problème, et identifier les objectifs à fixer et les moyens à mobiliser. C'est peut-être ici l'option méthodologique des références multiples qui devrait être réexaminée : la conclusion selon laquelle, dans le jeu des scénarios « sans politique climatique », le primat de l'environnement sur la croissance suffit à entraîner de bas profils d'émission, est proche de la tautologie. Il suffirait donc de mettre en œuvre ce primat — mais comment ? — et le problème climatique serait déjà largement résolu...

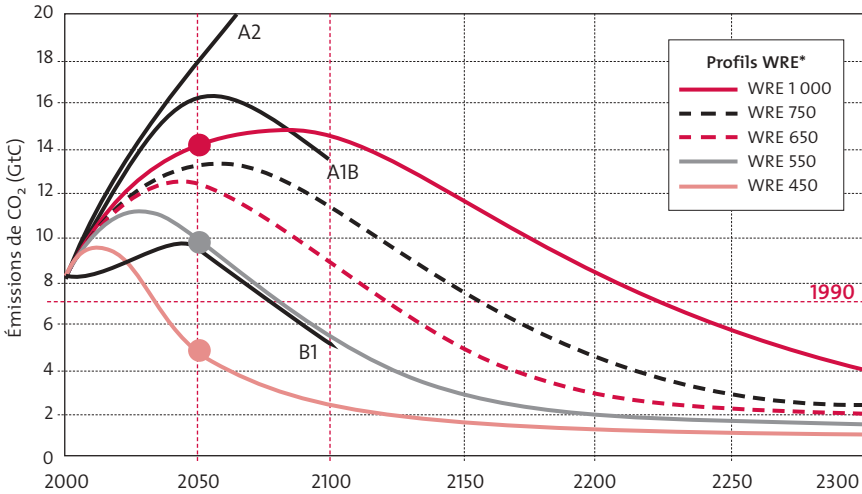
Les scénarios de stabilisation des concentrations : implications et conséquences

Aux scénarios « sans politique » répondent des scénarios d'atténuation du changement climatique par la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ils sont le plus souvent définis, notamment dans les travaux du groupe de travail 1 du GIEC, comme devant répondre à des profils d'émission assurant la stabilisation des concentrations à des niveaux préétablis : communément, pour le CO₂, 450, 550, 650 ppmv⁷ etc. Les scénarios A du RSSE conduisent, à l'exception de A1T, à des profils de concentration très supérieurs à 1 000 ppmv. Les deux scénarios B et le scénario A1T s'inscrivent quant à eux sur des trajectoires comprises entre 550 et 650 ppmv.

Parmi les ordres de grandeur robustes et utiles à retenir pour la décision publique, il apparaît que les niveaux de stabilisation 450 et 550 ppmv-CO₂ imposent un sommet pour les émissions mondiales avant 2030, et des ni-

7. Parties ou particules par million en volume.

Graphique 1 — Profils d'émission pour différents niveaux de stabilisation des concentrations



*WRE pour Wigley, Richels et Edmonds, l'équipe à l'origine de la définition de ces profils d'émission.

Lecture : Les courbes (traits pleins) et points rouge clair, gris et rouges correspondent à trois profils d'émission permettant une stabilisation des concentrations à respectivement 450, 550, 650 ppmv de CO₂. En noir apparaissent trois des scénarios du RSSE, A2, A1B et B1.

Source : Figure 6-1 du résumé du troisième rapport d'évaluation du GIEC, complétée par l'auteur.

veaux d'émission en 2050 ramenés à respectivement 70 % et 140 % de celui de 1990. L'ensemble des travaux du groupe de travail 3 du GIEC permet de dresser un inventaire des potentiels technologiques et économiques pour l'atténuation, des politiques et mesures susceptibles d'être mises en œuvre, et enfin des coûts et avantages, directs et indirects, de la mise en œuvre des options d'atténuation. Mais le groupe de travail 3 ne privilégie pas le choix d'un scénario d'atténuation.

D'autres études ont permis l'exploration de scénarios alternatifs pour la réduction des émissions. C'est le cas notamment en Europe, au niveau de l'Union et dans plusieurs États membres. Ainsi, l'étude *Greenhouse Gas Reduction Pathways* [GRP] ⁸, menée à l'instigation de la direction générale Environnement de la Commission européenne, a-t-elle conduit à explorer, d'une part des profils d'émission susceptibles de satisfaire à l'objectif climatique européen ⁹ et

8. LEPII-EPE et alii. *Greenhouse Reduction Pathways in the UN-FCCC Process up to 2025*. Bruxelles : Commission européenne, 2003, site Internet <http://europa.eu.int/comm/environment/climat/studies.htm>.

9. Il vise à limiter l'augmentation moyenne des températures à + 2°C par rapport à la situation préindustrielle.

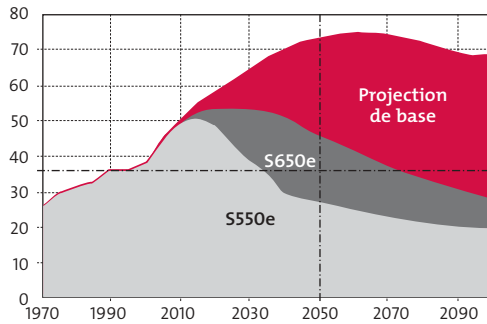
d'autre part la répartition de l'objectif mondial entre les grandes catégories de pays, pour plusieurs systèmes d'allocation des droits mondiaux d'émission.

La méthodologie est ici assez radicalement différente de celle du RSSE, puisque l'étude GRP s'appuie sur une « projection de base » (*baseline*), définie comme une hypothèse centrale en l'absence de politique climatique (au-delà des engagements déjà pris). Malgré une croissance économique plus faible que dans le scénario A1B du RSSE, mais en raison d'un fort appel au charbon, cette projection de base présente un profil assez comparable à celui d'A1B, avec un doublement des émissions en 2050 par rapport à 1990.

À cette projection de base sont donc opposés deux scénarios-objectif visant à une stabilisation des concentrations pour les six GES du protocole de Kyoto, l'un à 550 et l'autre à 650 ppmv (S550e et S650e, correspondant à 450 et 550 ppmv pour le CO₂ seul). On retrouve ici un ordre de grandeur très caractéristique et déjà rencontré dans les profils de stabilisation du GIEC : une politique climatique mondiale visant à limiter significativement le réchauffement planétaire devra très probablement viser à revenir en 2050 à un niveau d'émission proche de l'actuel, ce qui constituera un effort considérable compte tenu des évolutions attendues dans le scénario central. En effet, la réduction globale à atteindre par rapport à la projection centrale est dans ce cas de 50 %.

Une fois les enveloppes globales identifiées, il reste encore à décrire quelles pourraient en être les conséquences en termes d'objectifs d'émission pour les différentes régions du monde. Alors qu'il ne peut y avoir de critère unique et faisant consensus d'équité internationale pour la répartition des objectifs entre les différentes régions et pays du monde, l'étude GRP a permis d'explorer les conséquences des différents schémas possibles. À partir de la multiplicité des propositions rencontrées dans la littérature, deux options ont été sélectionnées comme étant potentiellement acceptables par un grand nombre de parties à la négociation : il s'agit d'une part de celle de la convergence à long terme des émissions par tête et d'autre part des systèmes multi-étapes (*multi-stage*) qui permettent de différencier les objectifs selon le niveau de développement des pays.

Graphique 2 — Profils d'émission de gaz à effet de serre (en Gt d'équivalent carbone) dans l'étude GRP



Source : étude GRP.

Tableau 3 — Objectifs / droits d'émission dans les scénarios GRP			
Profil d'émission	Augmentation de la température (GIEC 2001)	Objectifs 2050 par rapport à 1990	
		Pays de l'annexe 1	Pays non-annexe 1
S650e S550 CO ₂	+ 2,5°C / préindustriel + 1,9°C / aujourd'hui	Division par facteur 2	x 2 / pays émergents x 5 / pays moins avancés
S550e S450 CO ₂	+ 1,6°C / préindustriel + 1,0°C / aujourd'hui	Division par facteur 4	x 1 / pays émergents x 3 / pays moins avancés
<i>Source</i> : auteur, d'après étude GRP.			

Sans entrer dans la description technique des différentes options et de leurs résultats, il suffit ici de retenir que l'allocation régionale des objectifs d'émission conduit, pour les solutions « acceptables », à des résultats assez robustes (tableau 3) : dans le scénario de stabilisation à 550 ppmv pour le CO₂, les émissions des pays de l'annexe 1¹⁰ doivent être ramenées en 2050 à la moitié de leur niveau actuel, alors que la croissance peut être encore significative dans les pays émergents et *a fortiori* les pays moins avancés ; pour le scénario à 450 ppmv, la réduction requise est une division par quatre des émissions pour les pays industrialisés, alors que les contraintes se renforcent significativement pour les pays en développement.

Innovations technologiques, incitations économiques et changements structurels

Les ordres de grandeur sont donc donnés : il faudra au plan mondial revenir en 2050 à des niveaux d'émission proches de l'actuel, ce qui impliquera pour les pays industrialisés une réduction des émissions d'un facteur deux à quatre. C'est bien dans cette perspective que s'inscrivent les scénarios dits « Facteur 4 », développés dans plusieurs pays européens dont la France. Ces scénarios, extrêmement ambitieux, constituent aujourd'hui la frontière à explorer dans les analyses de prospective économique et énergétique, pour définir les traits structurants des sociétés à bas profil d'émission de GES¹¹.

Les adaptations impliquées par les scénarios de type Facteur 4 seront la combinaison de changements de comportement, de nouvelles orientations dans les infrastructures, enfin de la diffusion d'un ensemble de nouvelles

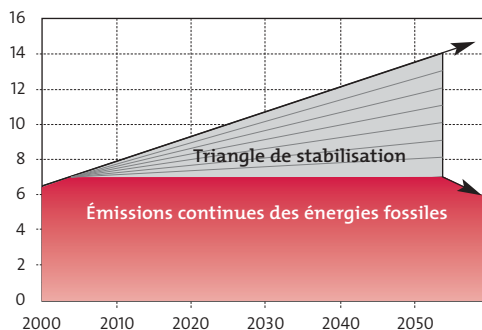
10. Les pays industrialisés, tels qu'identifiés dans la convention cadre.

11. Pour la France, voir RADANNE Pierre. *La Division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050*. Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004, site Internet www.effet-de-serre.gouv.fr/fr/etudes/Facteur4-franc%20BAT.pdf; PRÉVOT Henri. « Diviser par trois en trente ou quarante ans nos émissions de CO₂ ». Site Internet www.2100.org/PrevotEnergie, 2004 ; ENERDATA & LEPII-EPE. *Prospective énergétique 2030-2050* (travaux pour la Direction générale de l'énergie et des matières premières). Site Internet www.industrie.gouv.fr/energie/prospect/textes/prosp-jr-2030-2050.htm, 2005.

technologies peu intensives en carbone. Nous reviendrons plus loin sur l'articulation comportements-infrastructures-technologies, mais il faut auparavant dresser une liste des options technologiques qui seront disponibles dans la première moitié du siècle, celle qui, on l'a vu, sera décisive pour la rupture dans les trajectoires d'émission ¹².

Le secteur de l'énergie est un secteur où les options technologiques sont contraintes par le sévère carcan des lois fondamentales de la thermodynamique. C'est de plus un secteur très intensif en investissement et à constantes de temps particulièrement élevées. Il n'y a donc pas de miracle à attendre et il n'y aura pas de solution unique. Au contraire, la maîtrise des émissions passera probablement par une combinatoire d'options diverses. C'est dans cette optique que R. Socolow et S. Pacala ¹³, proposent d'enfoncer une série de « coins » (*wedges*) pour éviter le scénario du doublement et réussir la stabilisation des émissions à 7 GtC (CO₂ énergie) jusqu'en 2050, pour une trajectoire de stabilisation à 500 ppmv (pour le CO₂). Ils recensent au total une quinzaine de « coins technologiques », regroupés en six portefeuilles et susceptibles selon eux de représenter chacun une économie d'une GtC en 2050. Il suffirait donc de mobiliser pleinement sept des quinze coins pour atteindre l'objectif (graphique 3).

Graphique 3 — Profil de stabilisation des émissions* et introduction des « coins technologiques » (*wedges*)



Lecture : la stabilisation des émissions jusqu'en 2050 suivie d'une baisse permet une trajectoire de stabilisation des concentrations à 500 ppmv CO₂.

*Émissions des énergies fossiles en GtC par an.

Source : PACALA Stephen, SOCOLOW Robert. *Op. cit.*

La liste indicative des « coins technologiques » s'établit comme suit :

- efficacité énergétique (bâtiment, transport, industrie et centrales électriques) ;
- électricité décarbonisée (gaz naturel, charbon ou gaz avec capture et stockage du carbone [CSC], nucléaire, renouvelables : éolien, solaire, hydraulique, géothermie) ;
- carburants / combustibles décarbonisés (carburants de synthèse avec CSC, biocarburants, hydrogène de source non carbonée) ;

12. Ce qui signifie bien que le changement de trajectoire devra se faire sans la contribution de l'énergie de fusion qui ne sera, dans le meilleur des cas, disponible qu'après 2050.

13. PACALA Stephen, SOCOLOW Robert. « Stabilization Wedges. Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies ». *Science*, 13 août 2004, vol. 305.

- substitutions de carburants / combustibles par de l'électricité décarbonisée (véhicules à batteries, pompes à chaleur) ;
- utilisation des puits de carbone (forêts, sols agricoles) ;
- gestion du méthane (gaz de décharges, élevage, riziculture, industrie gazière).

Cette approche a le mérite de montrer que la stabilisation n'est pas un objectif hors d'atteinte, que des technologies existent et qu'elles peuvent être mises en œuvre à des coûts raisonnables. Les auteurs estiment en effet ces coûts comme étant, dans la plupart des cas, inférieurs à 100 dollars US par tonne de carbone, soit 25 euros par tonne de CO₂. Le message est efficace en termes d'information et de mobilisation des décideurs publics ou des industriels, il ne doit cependant pas conduire à sous-estimer la difficulté de la tâche : au-delà des potentiels et des « coûts d'ingénieur », comment peut-on déclencher les processus d'innovation et de changements sociaux nécessaires ?

De plus en plus, les modèles énergétiques détaillés s'attachent à explorer ce type de question et à fournir des éléments d'analyse quantifiés. Au cours des dernières années, la plupart ont en effet été développés de façon non seulement à identifier les technologies clés du futur — avec des portefeuilles similaires à ceux identifiés par R. Socolow et S. Pacala — mais aussi pour décrire avec plus de précision les dynamiques du progrès technologique. Ainsi, la prise en compte des « effets d'apprentissage », voire des impacts de la recherche-développement dans des « courbes d'apprentissage à deux facteurs » permet-elle une endogénéisation du progrès technique dans un nombre croissant de modèles. Les résultats doivent être utilisés avec prudence, car l'innovation est par définition un processus incertain ; néanmoins, la projection des coûts des différentes technologies à long terme devint dans ce processus beaucoup moins arbitraire que lors d'une simple introduction d'hypothèses exogènes sur les coûts futurs.

Ces modèles « à technologie explicite » permettent d'analyser l'impact de l'introduction d'une valeur du carbone — représentant une taxe CO₂ ou le prix d'un quota d'émission — sur l'« ordre de mérite » des différentes technologies, les décisions d'investissement et enfin les comportements de consommation. On peut alors rechercher le niveau de la valeur du carbone permettant de satisfaire les objectifs d'émission de long terme et analyser la contribution des quatre grandes options : efficacité énergétique, énergies renouvelables, énergie nucléaire, et capture et stockage du carbone. Trois grands types de conclusion ressortent des études de ce genre aujourd'hui disponibles ¹⁴ :

14. Voir par exemple l'exercice mené avec le modèle POLES pour la Direction générale de l'énergie et des matières premières afin de simuler un scénario de référence et un scénario Facteur 4 pour la France : ENERDATA & LEPII-EPE (*op. cit.*).

1) Plus l'objectif de réduction des émissions est ambitieux — comme c'est le cas dans les scénarios mondiaux 450 ppmv CO₂ avec Facteur 4 dans les pays industrialisés — et moins il devient possible de se passer de l'une, *a fortiori* de deux, de ces grandes options. Ainsi, les scénarios de « sortie du nucléaire » ne semblent pas compatibles avec la recherche d'un Facteur 4 dans les pays industrialisés.

2) La valeur du carbone qui accompagnerait de telles politiques (taxe ou prix du quota) devrait être élevée et dépasser le seuil des 100 euros par tonne de CO₂, correspondant à un différentiel de coût entre les solutions énergétiques avec et sans carbone équivalent à 45 dollars US le baril. Ceci permettrait de rendre compétitives la plupart des solutions à bas contenu en carbone. Mais la valeur du carbone devra être plus élevée car dans les scénarios Facteur 4, d'une part chaque option doit être rapidement poussée à proximité de ses limites, et d'autre part la demande doit être fortement contrainte par l'effet-prix (pour l'essence, compte tenu des taxes existantes, un surcoût de 100 euros par tonne de CO₂ ou 45 dollars US le baril ne représente qu'un supplément de 0,30 euro par litre ; on a pu le constater ces derniers mois).

3) Enfin, les simulations de scénarios énergétiques mondiaux sous forte contrainte carbone montrent la nécessité de la prise en compte des interactions entre dynamiques des marchés énergétiques et dynamiques des politiques climatiques. En effet, la contrainte carbone limite au plan mondial le retour du charbon aux quantités qui peuvent être utilisées avec séquestration, mais elle limite également de manière notable l'utilisation du pétrole. Dans les scénarios de forte contrainte, l'usage du pétrole est réduit et, sur le marché international, ce produit devient moins rare et moins cher que dans les projections sans politique. L'action mondiale en faveur du climat apparaît alors comme la solution pour gérer en douceur, et par la maîtrise de la demande, un « pic pétrolier » qui sinon sera imposé par les contraintes d'offre. Ce constat mérite sans doute un examen attentif de la part des décideurs politiques...

Les modèles énergétiques globaux fournissent donc un ensemble d'éclairages indispensables à la définition des politiques climatiques. Mais ils ne permettent pas encore une description complète des conditions de la transition vers des sociétés à bas profil d'émission. Les résultats obtenus pour la valeur du carbone doivent, dans ce contexte, être pris avec prudence car ils sont d'une certaine manière contingents à l'état actuel de la modélisation. Plus celle-ci progressera dans la description des marges d'ajustement des systèmes techniques et économiques, avec en particulier la prise en compte des changements dans les infrastructures urbaines et de transport, ou celle de la dématérialisation-transmatérialisation, et plus les estimations de la valeur du carbone seront révisées à la baisse. Ce diagnostic peut susciter quelques frustrations, il correspond cependant à l'expérience et renvoie bien à un usage raisonné des modèles économiques, outils imparfaits mais améliorables.

Les scénarios énergétiques mondiaux permettent de faire apparaître l'énorme distance qui sépare les scénarios sans politique des scénarios souhaitables pour la maîtrise du changement climatique. Dans l'état actuel des connaissances, l'enjeu est bien d'éviter le doublement des émissions mondiales d'ici 2050 et d'assurer le retour le plus rapide possible au niveau actuel d'émission. S'il n'y a pas d'option miracle à attendre pour les 50 prochaines années, une multiplicité de solutions partielles pourront être mobilisées, au sein de quelques grands portefeuilles technologiques. Le rôle des politiques publiques sera tout d'abord de stimuler le développement de ces portefeuilles par des politiques de recherche-développement adaptées. Cela permettra en particulier de créer les paniers de technologies dans lesquels les acteurs économiques pourront venir puiser lorsqu'ils seront soumis à des contraintes d'émission ou à des incitations économiques croissantes, et de limiter ainsi leurs coûts d'ajustement.

Mais les politiques publiques auront aussi un rôle crucial dans la modification nécessaire de l'aménagement du territoire, des infrastructures urbaines, des réseaux de transport qui devront accompagner la transition vers une société à bas profil d'émission. En effet, ces changements sont techniquement nécessaires et ils doivent être entrepris d'autant plus tôt que les constantes de temps sont importantes. Surtout, ils seront indispensables pour limiter les pertes d'aménités ou de bien-être occasionnées par l'introduction de nouvelles contraintes fortes dans tous les secteurs de la société. Sur le long terme, les politiques d'infrastructures seront donc le garant de l'acceptabilité locale, par les citoyens, des politiques de protection de l'environnement planétaire.

Frank Carré et Jean-Claude Petit ¹

Nucléaire : la génération IV

LES ENJEUX DES NOUVELLES
GÉNÉRATIONS DE CENTRALES NUCLÉAIRES

L'offre mondiale d'énergie est confrontée, à long terme, à trois contraintes : l'augmentation croissante de la demande des pays en développement, l'épuisement progressif des ressources fossiles et la limitation des émissions de gaz à effet de serre, conformément au protocole de Kyoto signé en 1997. Si l'on ajoute à cela la volonté de plus en plus d'États de garantir une sécurité d'approvisionnement minimale, l'équation se complique.

S'appuyant notamment sur divers scénarios de prospective énergétique établis ces dernières années, Frank Carré et Jean-Claude Petit soulignent la nécessité croissante, outre de maîtriser la consommation énergétique, de recourir aux énergies non carbonées afin de maintenir les chances d'un développement durable. Parmi elles, le nucléaire est, selon eux, la source énergétique la mieux placée (non émettrice de gaz à effet de serre, garante d'une réelle indépendance et d'une stabilité des prix...).

Comme le montre cet article, de plus en plus de pays développés (États-Unis, France, Japon...) l'ont compris, qui investissent, à l'échelle nationale comme dans un cadre international, dans des politiques énergétiques axées sur le nucléaire. D'un point de vue technique, les auteurs rappellent la succession des différentes générations de centrales nucléaires depuis les années 1950 ; ils présentent aussi les générations à venir, en particulier la quatrième génération, actuellement à l'étude dans le cadre d'un forum international. Ils indiquent enfin sur quelles bases (économie, sûreté, gestion des déchets...) ont été sélectionnés

1. Commissariat à l'énergie atomique (CEA). Les auteurs remercient David Prout (CEA) pour ses commentaires avisés concernant les aspects économiques des politiques énergétiques.

les concepts à l'étude dans le cadre de cette quatrième génération (qui ne devrait pas entrer en fonction avant 2040).

L'option nucléaire est, selon les auteurs, la plus pertinente à long terme, à tous égards. Cependant, les logiques court-termistes prévalant au niveau tant des investisseurs que des producteurs d'électricité, elle nécessite une action volontariste de la part des pouvoirs publics, ce dans une perspective de l'ordre du demi-siècle.

S.D.

Enjeux énergétiques et avantages du nucléaire

La problématique de l'énergie au XXI^e siècle peut se résumer simplement : comment fournir l'énergie dont les populations auront besoin dans les décennies à venir, au niveau mondial, sous la triple contrainte d'une augmentation constante de la demande des pays en voie de développement, de ressources fossiles finies et d'une obligation, prise dans le cadre du protocole de Kyoto, de limiter les émissions dans l'atmosphère de gaz à effet de serre ² ?

Le prolongement de la domination des énergies fossiles sur le mixte énergétique tel qu'il est envisagé dans divers scénarios ³ ne répond pas aux enjeux du siècle qui s'ouvre. Il conduit à une dépendance croissante du monde envers un petit nombre de pays pour son approvisionnement énergétique (63 % des réserves de pétrole sont concentrées au Moyen-Orient et 60 % de celles de gaz en Russie, en Iran et au Qatar). Il induit également une forte croissance des émissions de gaz à effet de serre (GES) ⁴, en particulier sous l'effet de l'augmentation de la consommation énergétique des pays en développement ⁵. Aujourd'hui, 1,5 milliard de personnes sont privées d'accès à l'électricité ; l'inégalité d'accès à l'énergie est criante et la croissance démographique devrait amener la population mondiale à un point haut en 2050 (avec environ neuf milliards d'individus). Une telle population représenterait un minimum de consommation d'énergie de 14 Gtep (gigatonnes équivalent pétrole) soit 50 % de plus que la consommation actuelle.

2. Pour limiter l'élévation de la température moyenne de la Terre à 2°C en 2050, les émissions mondiales de gaz à effet de serre (GES) devraient être réduites d'un facteur deux.

3. Voir par exemple AIE (Agence internationale de l'énergie). *Energy to 2050. Scenarios for a Sustainable Future*. Paris : AIE, 2003.

4. Environ 80 % de l'énergie primaire utilisée dans le monde émettant du CO₂.

5. Selon l'AIE, l'augmentation de la consommation énergétique mondiale d'ici 2030 sera principalement le fait des pays en développement (pour plus de 60 %), la part de la consommation des pays développés dans la consommation mondiale d'énergie primaire passant de 57 % en 2002 à 45 % en 2030.

Face à ces contraintes, il est clair que la structure de l’approvisionnement énergétique actuel n’est pas soutenable. Les enseignements des scénarios énergétiques qui ont été développés dans divers cadres permettent de dégager quelques pistes à suivre pour répondre au défi énergétique. C’est en particulier le cas des travaux publiés en 2000 par le Groupe intergouvernemental d’experts sur l’évolution du climat (GIEC) ⁶, qui présentent des scénarios contrastés d’évolution des émissions de gaz à effet de serre en fonction de différentes hypothèses sur l’évolution de la démographie, de la croissance économique, de l’intensité énergétique et de la nature des énergies utilisées. Il découle de ces travaux, conduits au niveau international, que ce sont les scénarios alliant une maîtrise de la demande énergétique et l’utilisation des énergies non carbonées qui permettent le mieux de limiter les émissions cumulées sur la période. Cette stratégie est celle qui a été adoptée par la France pour atteindre l’objectif de division par quatre des émissions par habitant à l’horizon 2050 ⁷.

Les atouts de l’énergie nucléaire pour répondre à ces enjeux, dans le cadre d’un mixte énergétique équilibré, peuvent se décliner en trois catégories :

— Une production d’électricité non émettrice de gaz à effet de serre. Cet avantage majeur du nucléaire sur les autres modes de production d’électricité peut devenir décisif si les contraintes environnementales devenaient très fortes et si le coût des émissions était internalisé (c’est-à-dire pris en charge) par les producteurs d’électricité. L’engagement des négociations sur les suites du protocole de Kyoto devrait permettre de préciser si une volonté politique collective de diminuer les rejets de GES existe au plan international. Pour le moment, les premiers marchés du carbone ont été mis en place. Ils doivent inciter les industriels à prendre en compte ces préoccupations dans leurs décisions en donnant un coût à ces rejets polluants. Toutefois, ils sont encore trop récents et pas assez développés pour pouvoir faire le bilan de leur efficacité. Par ailleurs, le niveau de prix d’équilibre sur ces marchés est directement déterminé par les efforts de réduction des émissions à effectuer, ceux-ci relevant pour leur part de décisions politiques.

— Une production d’électricité qui participe à l’indépendance et à la sécurité énergétique. Dans un contexte où les énergies fossiles étaient abondantes et (relativement) bon marché, les préoccupations d’indépendance et de sécurité énergétique n’étaient pas prioritaires. Dans cet environnement, les pouvoirs publics ont laissé la production d’électricité à partir du gaz se développer ⁸, forte de ses atouts pour les producteurs d’électricité (faible investissement,

6. GIEC (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, en anglais). *Rapport spécial du groupe de travail 3 du GIEC sur les scénarios d’émission*. Genève : GIEC, 2000.

7. Objectif inscrit dans la dernière loi française d’orientation sur l’énergie.

8. La moitié des capacités de production installées entre 1997 et 2002 fonctionnent au gaz (*World Energy Outlook 2000* et 2004 de l’AIE).

temps de construction bref et retour sur capital rapide). Cependant, dans la perspective d'une hausse durable des prix des énergies fossiles (singulièrement du pétrole, du fait notamment de l'épuisement progressif des réserves) et, à terme, d'une concentration des sources d'approvisionnement dans un petit nombre de pays, ces sujets reviennent au premier plan de l'actualité.

La question d'une relance du nucléaire n'est plus taboue dans plusieurs pays occidentaux où elle l'était auparavant. Face à la tendance actuelle des opérateurs électriques à investir massivement dans des moyens de production au gaz (ce qui accroît la dépendance des économies nationales vis-à-vis des approvisionnements en hydrocarbures), les pouvoirs publics de nombreux pays cherchent les moyens de diversifier les modes de production d'électricité. Dans ce contexte, l'énergie nucléaire est un axe de diversification important, avec le déploiement de réacteurs à eau (qui n'utilisent que 0,5 % de l'uranium) jusqu'au milieu du XXI^e siècle, puis celui des réacteurs rapides sur-générateurs auxquels les ressources connues en uranium garantissent un approvisionnement sur plusieurs millénaires du fait qu'ils permettent d'utiliser plus de 80 % de l'uranium.

— Une production d'électricité à des prix stables, indépendants des variations de prix des hydrocarbures. La structure de coût du kWh nucléaire induit une grande stabilité de son prix. En effet, plus de 60 % du coût sont imputables aux coûts d'investissement et le coût du combustible (y compris l'enrichissement et le retraitement) ne représente qu'environ 15 % du coût total. Cette particularité du nucléaire lui confère une grande stabilité des coûts de production, par opposition aux centrales à gaz pour lesquelles le coût du combustible représente plus de 60 % du coût du kWh. Cet avantage est apprécié des industriels gros consommateurs d'électricité qui souhaitent obtenir une fourniture régulière à prix compétitifs non volatils.

Toutefois, l'importance des investissements à effectuer pour construire une centrale nucléaire (deux à trois fois plus élevés que pour une centrale à gaz) et un temps de retour sur capital beaucoup plus long que pour les autres modes de production, défavorisent l'industrie nucléaire par rapport à ses concurrents. C'est particulièrement le cas dans un contexte de libéralisation des marchés électriques. Il en découle, dans la plupart des pays, la nécessité pour les pouvoirs publics de prendre leurs responsabilités conjointement avec les industriels de ce secteur.

Malgré ces difficultés, plusieurs des prévisions actuelles sur la situation énergétique mondiale s'accordent sur une forte croissance du nucléaire entre 2030 et 2050. Cette source d'énergie, qui représente aujourd'hui seulement 6 % de l'énergie primaire consommée, pourrait, en 2050, voir sa part monter à 20 % ou 30 % alors que la consommation totale aura augmenté d'au moins 50 %. Dans une telle hypothèse, la puissance installée en nucléaire serait alors comprise entre 1 500 et 2 500 GWe (gigawatts électriques), chiffre qui

LA SURGÉNÉRATION

La surgénération s'obtient dans les réacteurs à neutrons rapides quand la production de plutonium fissile (isotopes 239 et 241) par capture de neutrons sur l'uranium 238, excède la disparition de combustible par fission pour la production d'énergie. En faisant plus que régénérer le combustible consommé, la surgénération permet de produire un excédent de combustible, utilisable pour déployer la filière de réacteurs concernée. Les recyclages suc-

cessifs du plutonium produit à partir de l'uranium 238 permettent de fissionner de 70 % à 90 % de l'uranium initial selon que les actinides mineurs (voir encadré *infra*) sont recyclés ou non. En comparaison, les réacteurs à eau ne fissionnent que 0,5 % de l'uranium naturel car leurs caractéristiques physiques les contraignent à consommer majoritairement l'uranium 235 qui n'en représente que 0,71 %.

F.C, J.-C.P.

est à comparer aux 350 GWe actuels et aux 500 GWe prévus pour 2030. Même le rapport du MIT, publié en 2003 par un groupe peu favorable au nucléaire, prend comme base de travail une puissance installée de 1 000 GWe en 2050⁹.

Tous ces chiffres sont certainement discutables. Il n'en reste pas moins que si la tendance est avérée, l'énergie nucléaire se trouvera confrontée à une problématique de développement durable qui, bien qu'étant dans l'esprit des pionniers de son développement, est restée au second plan dans les réalisations ayant conduit au succès industriel actuel.

Cette problématique de développement durable a été rapidement au centre des premières réflexions du groupe international réuni sous l'impulsion des États-Unis à partir de 2000 (GIF : *Generation IV International Forum*, Forum international Génération IV), qui s'est fixé comme objectif de définir et d'étudier différents concepts de nouvelles centrales nucléaires, dites de quatrième génération, susceptibles de répondre à cet enjeu.

Politiques énergétiques

Cette analyse des scénarios probables d'évolution de la demande en énergie et des contraintes qui y sont associées, a conduit au cours des dernières années à de nombreuses études visant soit à redéfinir la politique énergétique de différents pays (États-Unis, Chine, Europe, etc.), soit à actualiser et à conforter les choix antérieurs (France, Japon, Finlande).

Le cas des États-Unis est, à cet égard, tout à fait exemplaire d'une telle évolution. Ainsi, le rapport publié en 2001 par l'administration américaine in-

9. MIT (Massachusetts Institute of Technology). *The Future of Nuclear Power. An Interdisciplinary MIT Report*. Cambridge (Mass.) : MIT, 2003, site Internet <http://web.mit.edu/nuclearpower>.

dique clairement qu'une place importante doit être faite au nucléaire en prévision de la forte croissance de la production d'énergie du pays ¹⁰. Venant s'ajouter aux inquiétudes manifestées par le Congrès américain au cours des années précédentes, cette orientation a conduit le Department of Energy (DOE) à promouvoir une relance industrielle à court terme (opération *Nuclear Power 2010*), à proposer à d'autres pays de s'associer pour activer la recherche de solutions durables (le GIF) et à briser le tabou du cycle fermé en mettant en évidence l'impasse à moyen terme du stockage direct des combustibles irradiés (opération AFCI : *Advanced Fuel Cycle Initiative*).

En outre, la déclaration du président des États-Unis en 2002 sur l'hydrogène, qui est à l'origine d'un véritable plan d'urgence, met aussi en exergue la nécessité de développer rapidement des moyens de production de ce nouveau vecteur énergétique (susceptible de remplacer l'électricité) à partir de l'énergie nucléaire. Le projet NGNP (*Next Generation Nuclear Plant*), qui prévoit pour 2015-2020 la mise en service d'un démonstrateur de production d'hydrogène avec un réacteur à haute température sur le centre du DOE dans l'Idaho, traduit la volonté d'action rapide de l'administration américaine.

Les plans énergétiques du Japon incluent depuis longtemps la préoccupation du long terme avec la nécessité de développer l'énergie nucléaire pour suppléer un défaut de ressources minérales dans le pays. Le Japon entend également mettre au point le cycle fermé et les réacteurs à neutrons rapides pour éviter une trop forte dépendance du marché de l'uranium. Les craintes pour l'environnement (effet de serre notamment) sont venues renforcer les argumentaires en faveur de cette politique, sans en changer l'essentiel. Dans sa composante long terme, le programme japonais intégrait aussi les perspectives de besoin de production d'hydrogène. Avec un récent réacteur expérimental à haute température et la recherche en laboratoire la plus avancée sur les procédés chimiques de production d'hydrogène à partir de l'eau, le Japon est bien placé dans la future compétition internationale sur ce thème.

La Chine est au premier plan de l'actualité pour les questions énergétiques. Le rythme de croissance de sa consommation et la prédominance du charbon dans la satisfaction de ses besoins en font un cas particulier compte tenu de sa taille. Après un début volontariste, suivi d'une période d'hésitation, le gouvernement chinois paraît bien décidé aujourd'hui à avancer résolument dans la voie de l'équipement électronucléaire. L'appel d'offres pour des systèmes de troisième génération émis au premier semestre 2005 marque une avancée plus rapide que les prévisions antérieures. Il semble bien que les Chinois envisagent une révision à la hausse de l'objectif de construire 25 tranches supplémentaires d'ici 2020.

10. NATIONAL ENERGY POLICY DEVELOPMENT GROUP. *National Energy Policy*. Washington, D.C. : Maison Blanche, 2001, site Internet www.whitehouse.gov/energy.

La situation européenne est évidemment plus contrastée. Le livre vert de 2000¹¹ a affirmé la nécessité de considérer à nouveau l'option nucléaire pour tenir en particulier les engagements de Kyoto. La décision finlandaise de construire un cinquième réacteur avec le choix de l'EPR (*European Pressurized Reactor*) a marqué un tournant dans ce qui paraissait une évolution inévitablement négative vis-à-vis du nucléaire dans la grande majorité des pays européens. Néanmoins, les blocages psychologiques, en Allemagne et dans une moindre mesure en Grande-Bretagne, empêchent l'Europe d'avoir une politique dynamique pour le développement du nucléaire, même si certains pays, notamment au sud, semblent prêts à reconsidérer leur position.

Dans ce contexte en évolution positive pour le nucléaire, la France a affirmé en 2003-2004 sa volonté, dans le cadre d'une loi, de conserver l'option nucléaire ouverte, puis de permettre à EDF (Électricité de France) de construire un premier réacteur de troisième génération avec l'EPR, en vue de préparer le renouvellement de son parc qui interviendra d'ici 2050. Elle a ainsi confirmé l'importance accordée au programme nucléaire pour assurer, dans les décennies à venir, la base de sa production électrique. Ces décisions confortent le fait que la France est bien, au plan mondial, une référence pour les choix relatifs à cette option. Le rôle de premier plan que lui donnent l'importance de son programme nucléaire et ses choix cohérents en matière de cycle, a placé l'industrie française dans une position de *leadership* qu'elle entend bien conserver.

À terme, la situation énergétique française, si elle est moins fragile que d'autres grâce au taux d'indépendance énergétique que lui assure son programme nucléaire, reste néanmoins marquée par l'absence de ressources fossiles propres, alors même que, comme d'autres pays, elle dépend à plus de 90 % du pétrole pour l'énergie consommée dans les transports. Pour faire face à ces enjeux, la France a entrepris une réflexion sur sa stratégie en matière de réacteurs du futur, intégrant les problématiques du cycle du combustible, de la gestion des « déchets ultimes » et de la production d'hydrogène. Le fait que d'autres pays partagent les mêmes préoccupations peut permettre que cette stratégie s'inscrive dans un cadre de coopération internationale renforcée et, par-là même, bénéficie d'un partage des efforts pour sa mise en œuvre.

Systèmes de production d'énergie nucléaire

Bref historique des générations de réacteurs nucléaires

Les potentialités de l'énergie nucléaire pour produire de l'électricité sont apparues peu après la Deuxième Guerre mondiale. Les concepts de réacteurs

11. *Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique*. Bruxelles : Commission européenne, 2000.

développés pour satisfaire les besoins croissants en énergie ont été dépendants des technologies disponibles, mais aussi fortement déterminés par les priorités et les contraintes propres à chaque époque. Sur une échelle de temps de l'ordre du siècle (*grosso modo*, sur la période allant de 1950 à 2050), quatre générations de réacteurs auront ainsi été conçus et développés, dont les grandes lignes sont maintenant rappelées.

La première génération

La première génération de réacteurs a été fortement influencée par les contraintes du cycle du combustible, notamment dans les années 1950-1960, en l'absence de technologie industrielle d'enrichissement de l'uranium. Par ailleurs, la volonté de certaines nations de se doter d'un outil de dissuasion nucléaire nécessitant la production de matières fissiles a évidemment joué un rôle décisif dans les choix de concepts. Dans ce contexte, les réacteurs devaient pouvoir fonctionner à l'uranium naturel (non enrichi) nécessitant l'utilisation de modérateurs tels que le graphite ou l'eau lourde. C'est ainsi que la filière dite Uranium naturel graphite gaz (UNGG) a été développée en France, donnant lieu, notamment, à la construction de six réacteurs à vocation électrogène (Saint-Laurent, Bugey et Chinon). Le CEA a été très fortement impliqué dans le développement de cette filière, en tant que bailleur de procédé. Les réacteurs de type Magnox en Grande-Bretagne appartiennent à la même génération.

Ces réacteurs présentaient des caractéristiques intéressantes (rendement thermodynamique, utilisation optimisée de l'uranium dans le cœur du réacteur, etc.), mais aussi des limitations liées à la technologie utilisée, en vue d'un développement à plus grande échelle : coût d'investissement plus important, difficulté d'amélioration de la sûreté et d'extrapolation à de plus grandes puissances. Ces limitations ont pénalisé leurs performances économiques par rapport aux réacteurs à eau légère qui seront développés dans la deuxième génération.

Dans cette première phase se développaient les préoccupations relatives au cycle du combustible, tant sous l'aspect d'une utilisation rationnelle et durable des ressources naturelles (recyclage des matières énergétiques, notamment le plutonium) que sous celui de la gestion des déchets. Ceci a conduit à développer les procédés et les installations de l'aval du cycle du combustible : traitement des combustibles usés, recyclage du plutonium. La France a ainsi adopté, dès le début, le cycle du combustible fondé sur le traitement-recyclage, permettant, d'une part, une meilleure utilisation des ressources, en recyclant le plutonium dans les réacteurs ; d'autre part, une réduction de la quantité et de la nocivité à long terme des déchets ultimes, conditionnés de façon à assurer un confinement sûr et durable des radionucléides. La première usine pour le retraitement des combustibles UNGG, construite à Marcoule, a été mise en service en 1958.

L'enjeu de la préservation des ressources naturelles en combustible et de leur utilisation optimale sur le long terme s'est traduit aussi, dès le début, par le développement des réacteurs surgénérateurs à neutrons rapides, refroidis au sodium, notamment aux États-Unis, en Russie, en France et au Japon. Si cette filière n'a pas eu le déploiement industriel rapide qu'on lui voyait initialement, notamment parce que le développement de l'énergie nucléaire s'est globalement ralenti dans le dernier quart du XX^e siècle, l'enjeu et l'objectif de la régénération restent entiers et sont inscrits, ainsi que celui de la minimisation des déchets radioactifs, dans les caractéristiques principales des systèmes de quatrième génération. Dans ce contexte, le savoir-faire technologique et industriel de la France résultant des installations Phénix (entré en service en 1973) et Super Phénix (1985), reste un acquis important pour le développement de la quatrième génération de réacteurs.

La deuxième génération

La deuxième génération de réacteurs constitue la majorité (85 %) du parc mondial aujourd'hui en exploitation : environ 450 réacteurs pour une puissance totale installée de l'ordre de 360 GWe. Cette génération a été développée pour rendre l'énergie nucléaire plus compétitive au plan économique et pour diminuer la dépendance énergétique de certains pays, au moment où des tensions importantes sur le marché des énergies fossiles se faisaient sentir (en particulier, après le premier choc pétrolier de 1973). La production de matières fissiles à des fins de défense n'était plus prioritaire, la technologie d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse étant au point, avec un déploiement industriel possible à grande échelle (usine Eurodif en France). Cette période fut celle du déploiement des réacteurs à eau, tant les réacteurs à eau pressurisée (REP) que les réacteurs à eau bouillante (REB).

Le retour d'expérience industriel de ces dernières décennies a permis de démontrer les performances économiques et environnementales de la production d'énergie nucléaire, lorsque les technologies appropriées sont mises en œuvre, avec un coût du kWh nucléaire très compétitif par rapport à celui des énergies fossiles et une réduction continue des rejets d'effluents à un niveau très en deçà des limites autorisées. Cette compétitivité du nucléaire s'entend en incluant dans le coût de production l'ensemble des dépenses de gestion des déchets et de démantèlement des centrales en fin de vie. Le fonctionnement cumulé de plus de 10 000 années-réacteurs au niveau mondial démontre par ailleurs la maturité industrielle de cette technologie.

Le CEA a été un acteur majeur, en partenariat avec Framatome et EDF, de la francisation de la filière REP du groupe américain Westinghouse. Il contribue depuis lors à la recherche-développement (R&D) en soutien au parc, notamment pour l'optimisation de l'exploitation et l'amélioration du parc de réacteurs, l'augmentation de la durée de vie des installations et l'augmentation des taux de combustion des combustibles nucléaires.

La troisième génération

L'évolution des contraintes présidant à la définition de ce qui constitue la troisième génération de réacteurs, a trait à un renforcement de la sûreté des réacteurs existants, même si ceux-ci témoignent déjà, dans les faits, d'un très haut niveau de sûreté, tout en maintenant les performances économiques de ces réacteurs au meilleur niveau. Ces tendances, qui trouvent leur origine dans l'accident de Three Mile Island (TMI) aux États-Unis, ont donné lieu à une meilleure prise en compte du facteur humain, à une conception plus élaborée de la conduite des réacteurs et à l'intégration progressive des études probabilistes de sûreté. Les résultats de ces études ont été en grande partie pris en compte et mis en œuvre dans la conduite des tranches les plus récentes de réacteurs de deuxième génération.

Pour la sûreté, l'évolution des réacteurs de troisième génération s'est déclinée suivant deux axes : d'une part, la mise en œuvre d'une redondance accrue des dispositifs de sûreté pour permettre de diminuer la probabilité d'occurrence d'accidents ; d'autre part, une conception appropriée garantissant de manière passive l'exécution des fonctions de sauvegarde en situation accidentelle. Le réacteur EPR, développé en partenariat franco-allemand, est un réacteur de type « évolutionnaire » intégrant des dispositifs actifs tels que l'ajout de trains de sûreté permettant de diminuer encore d'un facteur 10 la probabilité d'un accident grave. De plus, d'autres dispositions à la conception permettent de gérer en toute sécurité les conséquences d'un tel accident grave, au point d'exclure le besoin d'évacuer les populations environnantes. Ces dispositions incluent notamment la mise en place d'un récupérateur de corium¹² sous la cuve pour limiter les conséquences d'un accident qui conduirait à la fusion du cœur du réacteur.

Une caractéristique importante de certains réacteurs de troisième génération, notamment l'EPR, concerne son aptitude à mieux consommer le plutonium dans les combustibles MOX¹³, contribuant ainsi à une meilleure utilisation en réacteurs du plutonium et permettant la maîtrise de son inventaire dans le parc. Le CEA a été tout particulièrement impliqué dans les études de R&D relatives à la gestion des accidents de dimensionnement ainsi qu'à la compréhension et la modélisation des accidents graves.

La quatrième génération

À la fin des années 1990, plusieurs pays ont entrepris des réflexions pour définir de nouveaux types de réacteurs. En particulier, le GIF, créé en 2000

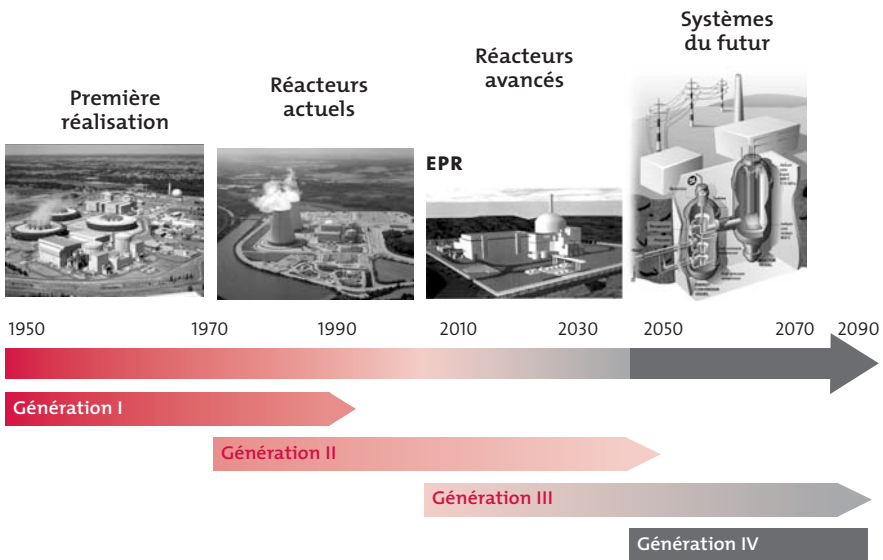
12. Le corium est formé par la fusion de l'ensemble des matériaux du cœur lors d'un accident grave.

13. *Mixed oxides*, combustible composé d'un mélange d'oxyde d'uranium et d'oxyde de plutonium recyclé.

à l'initiative des États-Unis, a pour ambition de définir, puis de développer, des systèmes innovants de production d'énergie nucléaire de quatrième génération. On parle désormais de systèmes (et non plus seulement de réacteurs) car ceux-ci sont conçus pour prendre en compte, de manière intégrée, les impératifs à la fois du réacteur lui-même et du cycle du combustible. Ces systèmes ont pour but de répondre aux enjeux et aux objectifs d'une production d'énergie durable, compétitive, sûre et accessible au plus grand nombre (voir *infra*) qui devraient pouvoir être déployés industriellement à l'international à l'horizon 2040.

Il est important de comprendre que ces générations de réacteurs se recouvrent partiellement dans le temps (voir graphique 1). Ainsi, les réacteurs de troisième génération commencent à être déployés alors qu'une grande partie du parc mondial restera constitué de réacteurs de deuxième génération pendant encore au moins les deux ou trois prochaines décennies (ces réacteurs étant à l'origine conçus pour une durée d'exploitation de 40 ans, extensible au cas par cas à 50 ans, voire plus). Durant cette période, environ la moitié du parc devrait être renouvelée et les perspectives de croissance, notamment en Asie et aux États-Unis, devraient assurer un marché au moins équivalent. Il paraît donc déjà assuré que le nombre de réacteurs de troisième génération à construire sera au moins égal, plus vraisemblablement supérieur, à celui des réacteurs de deuxième génération encore en service. Compte tenu de la

Graphique 1 — La succession des générations de réacteurs nucléaires



durée de vie prévue pour les réacteurs de troisième génération (60 ans), il y en aura encore en service à la fin du siècle alors que les réacteurs de quatrième génération pourraient commencer à être déployés industriellement à partir de 2040 (avec une durée de vie de 60 ans également).

Forum Génération IV

L'initiative du Forum international Génération IV (GIF) avait été précédée de plusieurs actes précurseurs aux États-Unis :

— La conduite en 1997 d'une revue des besoins de R&D dans le domaine de l'énergie par le President's Committee of Advisors on Science and Technology (PCAST), qui a abouti à la proposition d'un programme pour satisfaire les besoins des États-Unis au cours du XXI^e siècle en respectant les préoccupations environnementales.

— La création en 1998 du Nuclear Energy Research Advisory Committee (NERAC) pour conseiller le DOE sur le programme de technologie nucléaire civile, suivie du lancement de la *Nuclear Energy Research Initiative* (NERI) destinée à soutenir, par des fonds publics, des recherches sur le nucléaire du futur dans les laboratoires nationaux américains, les universités et l'industrie.

— Et plusieurs initiatives en 2001, parmi lesquelles : l'élargissement des projets NERI à l'international, permettant la conduite de projets communs cofinancés dans un cadre de coopération bilatérale (notamment avec la France) ; les projets de loi des sénateurs Murkowski puis Domenici visant à « financer le programme de R&D du DOE sur les réacteurs de la génération IV à hauteur de 50 millions de dollars US par an » ; la parution en 2001 d'un rapport de politique énergétique préparé sous la conduite du vice-président, soutenant le développement de l'énergie nucléaire aux États-Unis en tant que composante majeure de la politique énergétique nationale (*Report of the National Energy Policy Development Group. Op. cit.*).

Le GIF a pour principe fondateur la reconnaissance, par les pays qui en sont membres, des atouts de l'énergie nucléaire pour satisfaire les besoins en énergie croissants dans le monde, dans une perspective de développement durable. Ce principe, inscrit dans la charte du Forum signée mi-2001, se concrétise par une volonté commune de créer un cadre international pour définir, développer et porter à maturité technique des systèmes nucléaires de quatrième génération (réacteurs et cycle du combustible) d'ici 2030. Le GIF regroupe 11 pays, dont les États-Unis, la France, le Japon, le Royaume-Uni, le Canada, la Corée du Sud, etc., ainsi que les pays signataires du traité Euratom ¹⁴.

14. La liste complète, à ce jour, des 11 membres du GIF est la suivante : Afrique du Sud, Argentine, Brésil, Canada, Corée du Sud, États-Unis, France, Japon, Royaume-Uni, Suisse, ainsi qu'Euratom.

LE PLUTONIUM ET LES RISQUES DE PROLIFÉRATION

Les réacteurs à eau utilisent un combustible contenant environ 4 % d'uranium 235 et 96 % d'uranium 238. Dans les réacteurs nucléaires, le plutonium est produit par la capture de neutrons sur l'uranium 238. Une partie de ce plutonium peut participer aux réactions de fission (isotopes 239 et 241 représentant 60 %) et contribue ainsi pour 40 % à l'énergie produite.

L'uranium 235 et le plutonium 239 sont des matières stratégiques pour les armes nucléaires. Le risque de prolifération correspond aux possibilités de produire ou de détourner de telles matières avec les technologies mises en

œuvre dans le cycle du combustible, notamment pour l'enrichissement et le traitement des combustibles usés. La maîtrise du risque de prolifération s'obtient à la fois par le contrôle de ces technologies à l'export, par l'utilisation d'une composition de combustible et de procédés de traitement inadaptés à la production de ces matières stratégiques, et par des contrôles des inventaires de matières nucléaires dans les centrales nucléaires et les usines du cycle, sous l'égide de l'Agence internationale de l'énergie atomique.

F.C, J.-C.P.

Les travaux des experts du GIF ont permis d'identifier les critères de développement durable que devront satisfaire ces nouveaux systèmes de quatrième génération, et de sélectionner des concepts répondant le mieux à cet ensemble de critères et susceptibles d'être déployés industriellement à partir de 2040¹⁵. Le Forum a également défini le programme de R&D nécessaire pour assurer la viabilité de ces concepts et, si les performances attendues sont confirmées, pour faciliter leur arrivée à maturité industrielle, puis organiser la mise en œuvre de ce programme en coopération internationale.

Critères de sélection des concepts pour la génération IV

Le choix des critères de développement durable a été évidemment un élément déterminant dans la logique de sélection des concepts. Il peut être résumé en cinq grands enjeux : l'économie, la sûreté, la gestion des déchets, la valorisation des ressources et la sécurité au sens large, incluant la lutte contre les risques de prolifération. Par ailleurs, les modes d'utilisation de l'énergie nucléaire, et notamment la possibilité de produire massivement de l'hydrogène, ont été un élément supplémentaire de choix des concepts.

L'économie

L'électricité produite aujourd'hui avec les centrales existantes est très compétitive, les progrès en cours sur la durée de vie des réacteurs ou sur les taux

15. Cette échéance correspond au début de la période de forte croissance annoncée par les prévisionnistes et permet de disposer d'un délai suffisant pour développer des solutions réellement innovantes.

de combustion des combustibles ne pouvant qu'améliorer encore la comparaison avec les autres sources d'énergie. Le réacteur EPR (troisième génération) présente à nouveau une avancée significative dans ce domaine. Pour la suite, le GIF a fixé deux objectifs : un coût d'investissement inférieur à 1 000 dollars US le kWe (coût « overnight »), associé à un temps de construction inférieur à cinq ans, et un coût global limité à 20 cents le kWh. À titre de comparaison, les coûts d'investissement et de production des réacteurs en cours de commercialisation (génération III) sont de l'ordre de 1 500 dollars US le kWe et 30 cents le kWh. Bien que ces objectifs soient ambitieux, ils n'ont pas joué un rôle déterminant dans la sélection des concepts, la plupart étant encore à un stade de définition trop préliminaire.

La sûreté

Le bilan des réacteurs actuels en termes de sûreté est très satisfaisant. Néanmoins, la conception de certains des réacteurs de deuxième génération a été marquée par les accidents de TMI et de Tchernobyl. Les travaux de recherche et d'ingénierie menés à partir du milieu des années 1980 ont permis de faire de nouveaux progrès, avec des approches différentes d'un pays ou d'un industriel à l'autre, mais avec dans tous les cas l'objectif de réduire encore la probabilité des accidents les plus graves et surtout d'en contenir les conséquences pour l'essentiel sur le site des installations. Dans ces conditions, le niveau atteint par la troisième génération constitue une référence et devient le minimum visé pour des systèmes de quatrième génération, sans que cela exclue, bien au contraire, la possibilité d'apporter encore des améliorations dans ce domaine de la sûreté.

La gestion des déchets

Depuis l'administration Carter (années 1980) et le renoncement, au moins temporaire, des États-Unis au cycle fermé (impliquant le recyclage du plutonium), la gestion des déchets de haute activité à vie longue s'est inscrite dans des contextes différents, suivant les choix relatifs au devenir des combustibles usés. La France a maintenu sa position en faveur du cycle fermé et laissé ouverte l'option du stockage profond pour la gestion des déchets ultimes. L'impossibilité, intervenue en 1990, de progresser dans la recherche d'un site a conduit le Parlement à voter la loi du 30 décembre 1991 instituant, en particulier, un délai de 15 ans pour compléter les travaux de recherche avant de décider du sort définitif de ces déchets de haute activité à vie longue.

En approchant de cette échéance, la solution du stockage en formation géologique profonde apparaît plus que jamais confortée, tant par les travaux menés en France que par les expériences étrangères. En complément de démonstrations très probantes sur le bon comportement à long terme des verres qui contiennent ces déchets de haute activité à vie longue après retraitement

des combustibles usés, il ressort des travaux de recherche une confirmation de l'intérêt de recycler le plutonium et une incitation à brûler les autres actinides, pour réduire fortement la radiotoxicité et la puissance thermique résiduelle à long terme des déchets ultimes, optimisant par-là même la gestion des colis en stockage profond.

Pour des raisons physiques simples, la destruction des actinides est beaucoup plus efficace avec des neutrons rapides. Cette conclusion rejoint celle des experts du GIF qui ont considéré la gestion globale des actinides comme un élément majeur dans le choix des concepts et ont donc attribué les meilleures notes pour ce critère aux réacteurs à neutrons rapides.

L'utilisation optimale des ressources

C'est également un enjeu important si l'on considère un fort développement du nucléaire à l'échelle du siècle. La Terre contient des quantités importantes de minerais d'uranium mais qui, pour la grande majorité, sont à très faible concentration. Les océans en renferment des milliards de tonnes, les phosphates en contiennent des dizaines de millions de tonnes, mais dans les deux cas les coûts d'extraction seraient prohibitifs pour la compétitivité de l'énergie nucléaire dans les conditions économiques actuelles.

À l'autre extrême, les ressources estimées pour des coûts de récupération n'excédant pas 100 dollars US par kg d'uranium, sont d'une dizaine de millions de tonnes¹⁶. La consommation actuelle est proche de 65 000 tonnes par an et, toujours dans l'hypothèse d'une croissance du parc mondial de centrales de l'ordre d'un facteur cinq en 2050, ces ressources seront épuisées avant la fin du siècle. En effet, les réacteurs à neutrons thermiques, en particulier les réacteurs à eau, ne peuvent pas valoriser plus de 1 % de la capacité énergétique de l'uranium naturel. Seuls les réacteurs rapides, avec le recyclage du

LES ACTINIDES

Les actinides sont les éléments de la classification périodique de la famille de l'actinium. Ils comprennent en particulier les éléments entrant dans la composition du combustible nucléaire (uranium et plutonium, appelés « actinides majeurs ») et leurs descendants produits par capture de neutrons (neptunium, américium, curium..., appelés « actinides mineurs »). Dans le cycle du combustible actuellement mis en œuvre en France, les actinides majeurs sont recyclés et les actinides mineurs (qui représentent environ 0,1 % du combustible usé) sont associés aux produits de fission dans les déchets vitrifiés.

Différents procédés de séparation et de recyclage des actinides mineurs sont à l'étude pour éliminer, dans le futur, ces éléments majoritairement responsables de la nocivité et du dégagement de chaleur à long terme dans les déchets actuels.

F.C., J.-C.P.

16. Voir le livre rouge de l'Agence pour l'énergie nucléaire (AEN) de l'OCDE (Organisation de coopération et de développement économiques).

plutonium et la surgénération, permettront d'en tirer tout le profit. Là encore, cette conclusion a été reprise par les experts du GIF et explique la sélection d'une grande majorité de concepts de réacteurs à neutrons rapides avec cycle fermé.

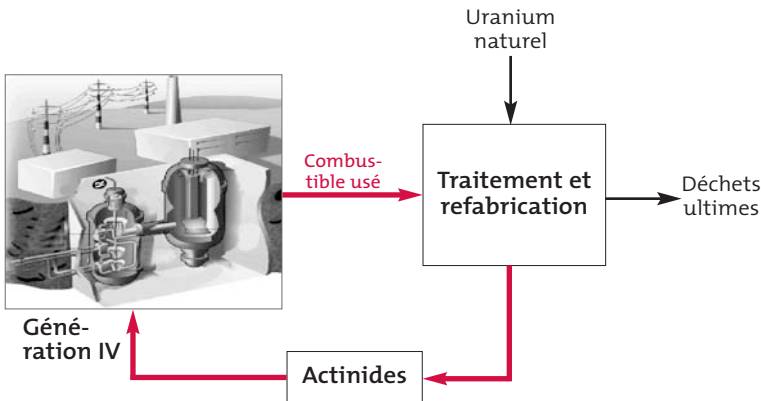
La sécurité

La lutte contre les risques de prolifération et les autres problèmes de sécurité, notamment liés au terrorisme sont plus que jamais d'actualité, et font également l'objet d'une inscription claire dans les préoccupations de nucléaire durable. Elle ne constitue pas nécessairement un critère déterminant pour le choix d'un concept de réacteur mais plutôt des exigences particulières de dimensionnement. Il n'en est pas de même pour le cycle, où le sujet a notamment conduit dans le passé à des querelles entre partisans du cycle ouvert et partisans du cycle fermé.

Les Américains, qui avaient prononcé dans les années 1970 un interdit sur le retraitement et toute forme de recyclage, face au danger que pouvait constituer un détournement de plutonium, ont accepté, dans une discussion technique sous pilotage du DOE, de reconsidérer l'option du cycle fermé, indispensable au regard des critères « ressources » et « déchets », à condition de trouver une solution robuste vis-à-vis des risques de prolifération.

C'est le recyclage intégral des actinides, apportant une protection intrinsèque des matières de même niveau que celle des combustibles irradiés, qui est apparu comme une réponse satisfaisante, sous réserve que, dans sa mise en œuvre, on évite la séparation et *a fortiori* la purification du plutonium (graphique 2).

Graphique 2 — Recyclage intégral du combustible considéré dans le cadre du GIF



FISSION VERSUS FUSION

Il existe deux façons de produire de l'énergie à partir de réactions nucléaires. La première consiste à casser un noyau lourd (d'uranium, par exemple) en deux noyaux plus légers et plus stables. C'est la fission, qui est utilisée dans les réacteurs nucléaires électrogènes actuels. La seconde est la fusion nucléaire, au cours de laquelle deux noyaux d'atomes légers se transforment en un noyau plus lourd.

La fusion thermonucléaire d'isotopes de l'hydrogène (deutérium et tritium), conduisant à des noyaux d'hélium, s'accompagne d'une très forte libération d'énergie. Cette réaction est très difficile à réaliser en raison de la répulsion électrostatique des noyaux. Les réactions de fusion se produisent dans des environnements extrêmement chauds comme le Soleil.

Pour reproduire sur Terre les températures (plus de 100 millions de degrés Celsius) et les densités suffisantes, on confine un plasma à l'intérieur de parois immatérielles, créées par des champs magnétiques, dans des machines appelées « Tokamak ». Les précédents projets — *Tore Supra* à Cadarache et JET (*Joint European Torus*) à Culham en Angleterre — ont permis de progresser dans la connaissance et la maîtrise des plasmas (notamment la durée de maintien). ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), qui constitue l'étape suivante, nécessite un investissement (cinq milliards d'euros de construction) qui implique de travailler dans un cadre international. Il s'agit d'une étape essentielle dans la démonstration scientifique et technique de la fusion comme source d'énergie. L'objectif est de produire 10 fois plus d'énergie (500 MW) que d'énergie injectée sur des durées significatives (400 secondes).

Le chemin vers un réacteur électrogène de fusion reste long, nécessitant un

démonstrateur de faible puissance avant un prototype de réacteur. Les étapes scientifiques et technologiques qui restent à franchir suggèrent qu'une filière de réacteurs ne pourrait être envisagée que pour la fin du siècle. Cette filière n'est donc pas en concurrence avec les réacteurs de génération IV dont le déploiement est prévu à partir 2040 : elle se présente plutôt comme la génération suivante.

L'intérêt des réacteurs de fusion repose sur l'abondance du combustible (deutérium et lithium, qui peut être source de tritium, sont abondants), l'absence d'émission de gaz à effet de serre, la sûreté intrinsèque de fonctionnement (faible quantité de combustible dans le réacteur ; tout dysfonctionnement conduit à l'arrêt des réactions de fusion) et des déchets en quantités limitées (la fusion produit de l'hélium, non radioactif ; les déchets technologiques rendus radioactifs par le bombardement neutronique seront à 90 % des déchets de très faible ou moyenne activité).

Le recours à la collaboration internationale tant pour le développement des réacteurs de génération IV que pour les recherches sur la fusion, permet de mutualiser les efforts en limitant les coûts pour chacun des partenaires. Le choix pour la France de participer aux recherches sur ces deux filières relève d'un choix stratégique. Les différences dans l'état d'avancement des recherches dans chaque domaine (pour la génération IV, on cherche à lever des verrous technologiques tandis que dans le domaine de la fusion on en est encore au stade de développements fondamentaux en vue de valider les concepts mêmes d'un tel réacteur), ainsi que les jalons temporels où on espère les voir déboucher, font que les recherches sur l'un des domaines ne se font pas au détriment de l'autre.

F.C., J.-C.P.

Un autre élément des réflexions menées par le GIF sur l'avenir du nucléaire porte sur les modes d'utilisation de cette énergie. En effet, l'objectif de faire croître la part du nucléaire dans la consommation d'énergie primaire à 20 % ou 30 % à échéance de 2050, ne peut pas être satisfait uniquement par l'intermédiaire du vecteur électricité et suppose de reconsidérer les possibilités d'usage direct de la chaleur (applications industrielles, chauffage collectif et surtout dessalement) ainsi que la production massive d'hydrogène ou d'hydrocarbures de synthèse, qui paraissent appelés à jouer un rôle majeur dans l'avenir des transports.

Tous les réacteurs produisent de la chaleur, utilisable en direct ou en marginal, et l'on peut toujours envisager de produire l'hydrogène par électrolyse à partir d'une centrale électronucléaire. Néanmoins, l'enjeu est économique et il est aisé de démontrer qu'au moins pour la production d'hydrogène à partir de l'eau, il est indispensable de partir d'une source de chaleur à haute température pour atteindre des rendements intéressants. Comme pour l'électricité, l'objectif serait de récupérer 50 % de l'énergie primaire consommée en potentiel énergétique du vecteur hydrogène.

Il faut noter que les experts internationaux du GIF ont passé au crible des critères retenus une centaine de concepts différents de systèmes de production d'énergie nucléaire pour n'en retenir que six répondant à l'objectif central de développement durable. Ce sont ces six concepts qui doivent faire à l'avenir l'objet d'importants programmes de R&D pour les amener à un stade de maturité permettant de faire un choix raisonné en vue du développement industriel de certains d'entre eux.

Les différents concepts étudiés

Une centaine d'experts ont contribué à la première phase du Forum (2000-2002), qui a abouti à la publication, en octobre 2002, d'un plan de développement des technologies jugées les plus prometteuses pour les prochaines décennies¹⁷. Six systèmes nucléaires ont été sélectionnés, pour permettre des avancées notables en matière de compétitivité économique, de sûreté, de réduction des déchets radioactifs à vie longue, d'économie des ressources en uranium, ainsi que de résistance à la prolifération et à la malveillance :

— SFR (*Sodium-cooled Fast Reactor System*) : nouvelle génération de réacteur rapide surgénérateur, refroidi au sodium (150 à 1 200 MWe), à l'architecture simplifiée, au coût d'investissement réduit et adapté à un mode de recyclage

17. *A Technology Roadmap for Generation IV Nuclear Energy Systems*. Washington, D.C. : USDOE / GIF, 2002, site Internet <http://gif.inel.gov/roadmap>.

du combustible résistant à la prolifération (ci-contre).

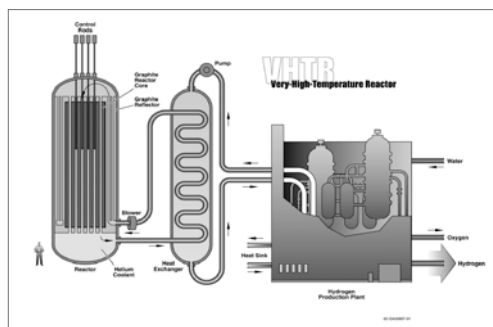
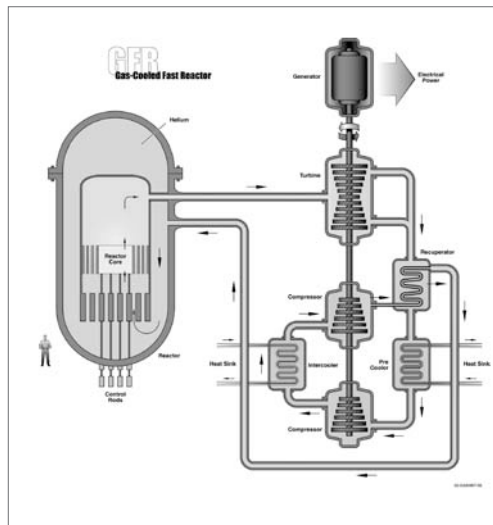
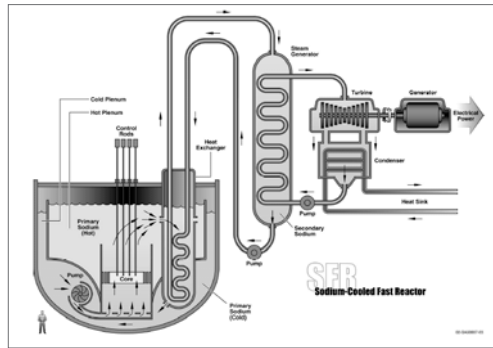
— GFR (*Gas-cooled Fast Reactor System*) : réacteur rapide refroidi au gaz (hélium) (1 200 MWe) alliant les avantages de la surgénération et de la haute température (850°C), avec ceux d'un recyclage du combustible résistant à la prolifération (ci-contre, deuxième schéma).

— LFR (*Lead-cooled Fast Reactor System*) : réacteur rapide surgénérateur (50 à 1 200 MWe) refroidi au plomb (550-800°C) ou au plomb-bismuth avec un mode de recyclage du combustible résistant à la prolifération.

— VHTR (*Very High Temperature Reactor System*) : réacteur à neutrons thermiques (600 MWth) et à très haute température (plus de 950°C) refroidi à l'hélium, dédié à la production d'hydrogène et à la fourniture de chaleur de procédé pour l'industrie, envisagé initialement sans recyclage du combustible (ci-contre).

— SCWR (*Supercritical Water-cooled Reactor System*) : réacteur refroidi à l'eau supercritique (1 700 MWe et 550°C) à rendement de conversion thermodynamique accru (44 %), envisagé à neutrons thermiques ou neutrons rapides avec recyclage du combustible.

— MSR (*Molten Salt Reactor System*) : réacteur (1 000 MWe) à neutrons thermiques à combustible sels fondus (fluorures thorium-uranium à 600-800 °C), capable dans son principe de régénérer et de recycler son combustible.



Parmi ces systèmes, seuls le réacteur rapide sodium (SFR) et le réacteur à très haute température (VHTR) ont donné lieu à des réalisations de prototypes précurseurs des filières considérées dans le GIF. Les principaux enjeux sont, pour le premier, la réduction du coût d'investissement et le recyclage intégral du combustible, et pour le second, un fonctionnement à 950°C sur plus de 60 ans, et le couplage aux applications de la chaleur à très haute température.

Les principaux enjeux pour les autres systèmes portent sur le développement d'un combustible résistant à très haute température (1 600°C) pour le réacteur rapide gaz (GFR), à la maîtrise du poids et de la corrosion pour le réacteur plomb (LFR), à la maîtrise de la corrosion et des accidents de dépressurisation pour les réacteurs à eau supercritique (SCWR), et à la maîtrise des procédés de traitement du sel et de la corrosion pour les réacteurs à sels fondus (MSR).

Ces systèmes visent avant tout la production d'électricité, mais certains ont également le potentiel de cogénérer de l'hydrogène à partir de l'eau ou de fournir de la chaleur à haute température pour des procédés industriels.

De ces six systèmes, cinq font appel au traitement-recyclage du combustible, et quatre utilisent les neutrons rapides, ce qui traduit l'importance accordée aux objectifs de minimisation des déchets à vie longue et d'économie des ressources en combustible.

Les travaux du Forum ont clairement conduit à faire reconnaître les systèmes de quatrième génération à neutrons rapides avec recyclage intégral du combustible comme la solution la plus aboutie pour minimiser la radiotoxicité potentielle et la charge thermique à long terme des déchets du cycle¹⁸.

Le rapport d'orientation technologique (*Technology Roadmap*), qui conclut la première phase des travaux du Forum, définit les actions de R&D à mener en coopération internationale pour les prochaines décennies sur les six systèmes sélectionnés. Trois phases principales y sont identifiées. La première dite « phase de faisabilité » doit lever les principaux verrous technologiques. La deuxième, qualifiée de « phase de performances », visera l'optimisation des systèmes qui auront franchi la première phase et la confirmation des performances qui ont conduit à leur sélection. Ces deux phases se termineront par la rédaction d'un dossier décisionnel pour la réalisation d'un démonstrateur à même d'être cofinancé par un consortium comprenant des industriels constructeurs et des utilisateurs potentiels du système. Les organismes de R&D joueront un rôle essentiel au cours des phases de faisabilité et de performances, mais il est également prévu une participation importante des industriels et des universités. D'autres pays que les membres du Forum

18. L'absence d'actinides permet à ces déchets, constitués pour l'essentiel de produits de fission, de retrouver le niveau de radiotoxicité de l'uranium naturel après trois siècles seulement.

pourront contribuer à la R&D à ce stade. La troisième phase, appelée « phase de démonstration », consolidera la maturité technologique du système avec la réalisation d'un démonstrateur ; elle impliquera davantage encore les industriels qui auront la charge du déploiement industriel après 2030. Pour une nouvelle filière, la R&D de faisabilité, qui s'étend typiquement jusqu'à 2015, sera suivie de la réalisation d'un prototype vers 2025, qui ouvre la voie vers l'industrialisation à l'horizon 2040.

De ces trois phases de développement, les deux premières sont des phases de coopération ouverte sur la R&D nécessaire pour développer les briques technologiques du système ; elles doivent être encadrées par un accord devant garantir un traitement équitable de la propriété intellectuelle. La troisième relève du développement industriel par un consortium, dans le cadre d'un accord spécifique qui devra, entre autres, traiter du transfert de la propriété intellectuelle créée par les projets de R&D, et par les études de conception détaillées du système et de son démonstrateur.

Les travaux en France sur les systèmes nucléaires du futur s'inscrivent à la fois dans la perspective du renouvellement du parc électronucléaire français, et de l'accompagnement de la stratégie d'Areva en matière de développement de réacteurs pour le marché de la chaleur industrielle à haute température et la production d'hydrogène (projet Antares).

Ces travaux s'organisent en trois axes :

- Une recherche prioritaire sur les systèmes à neutrons rapides avec recyclage du combustible, susceptibles d'être introduits dans le parc français à l'horizon 2040 (réacteurs rapides à caloporteur sodium ou gaz).
- Une recherche à un niveau inférieur, mais significatif, pour développer en coopération étroite avec les partenaires industriels les technologies clés pour la fourniture de chaleur à très haute température pour l'industrie et la production nucléaire d'hydrogène (réacteurs à gaz à très haute température et à neutrons thermiques ou rapides, et procédés de décomposition de l'eau).
- La poursuite des recherches d'innovations pour les réacteurs à eau en matière de combustibles robustes ou plus économiques, de chaudières optimisées pour les puissances de 300 et 2 000 MWe pouvant compléter l'offre réacteur actuelle d'Areva (EPR 1 600 MWe et SWR 1 000 MWe) et, plus globalement, d'optimisation des réacteurs de génération III, notamment en matière de facteur de conversion.

Les deux premiers axes de R&D s'inscrivent clairement dans la perspective d'une participation des acteurs français du nucléaire au GIF. À ces travaux s'ajoute une activité de recherche sur les filières plus prospectives que sont les réacteurs à sels fondus et les réacteurs rapides à caloporteur plomb ou eau supercritique. Les travaux du CEA sur l'ensemble de ces objectifs, actuelle-

ment financés à hauteur de 40 millions d'euros par an, sont coordonnés avec ceux de ses partenaires de la recherche (Centre national de la recherche scientifique et universités) et de l'industrie (Areva et EDF).

En Europe, la publication en novembre 2000 du rapport *Vers une stratégie européenne de sécurité d'approvisionnement énergétique* par la Commission européenne (*op. cit.*), et l'entrée des pays signataires du traité Euratom comme onzième membre du GIF, ont conduit à structurer le volet du programme cadre de recherche et développement (PCRD) consacré au nucléaire du futur en projets identiques à ceux considérés dans le GIF, pour faciliter les échanges entre les deux programmes. Des recommandations en cours d'élaboration pour le septième PCRD suggèrent la mise en place d'un volet de R&D à part entière sur les systèmes nucléaires du futur, doté d'au moins 50 millions d'euros au lieu de 12,5 millions d'euros pour les cinquième et sixième PCRD (part de la Commission). Consciente des enjeux de cette quatrième génération de systèmes nucléaires pour répondre aux défis énergétiques de la planète, dans le cadre d'un développement durable, l'Union européenne semble donc prête à consentir un effort de R&D significatif.

*
**

Les scénarios à très long terme montrent que la maîtrise des enjeux énergétiques du XXI^e siècle passe par le recours massif à des énergies non émettrices de gaz à effet de serre (dont le nucléaire) et par des efforts de maîtrise de la consommation d'énergie. Toutefois, depuis les années 1990, le développement de l'énergie nucléaire marque le pas au profit des filières au gaz naturel, du fait principalement des coûts d'investissement et du retour sur capital défavorables au nucléaire si l'on ne considère que le court terme, comme y pousse la libéralisation actuelle des marchés électriques. Le prolongement de la tendance actuelle conduirait à une grande dépendance de la production électrique aux ressources gazières et à un niveau d'émission qui ne permet pas d'envisager une réduction massive des émissions de gaz à effet de serre. Comme les pays développés vont devoir, à court et moyen termes, renouveler les centrales électriques existantes, les décisions qui seront prises structureront le parc de production pour les 50 prochaines années.

La difficulté à laquelle est confrontée aujourd'hui l'industrie nucléaire est que les principaux atouts de cette énergie sont collectifs et qu'elle apporte des réponses à des préoccupations qui ne sont pas, à court terme, décisives pour les choix d'investissement des opérateurs électriques. Avec la libéralisation des marchés électriques et la privatisation de nombreux électriciens, les préoccupations de sécurité d'approvisionnement ne sont plus déterminantes pour les choix d'investissement et la contrainte d'une réduction des émissions de gaz à effet de serre n'est pas encore assez forte pour limiter l'attrait des technologies utilisatrices des énergies fossiles.

Si les prix des hydrocarbures ne se maintenaient pas à un niveau élevé (ce qui semble cependant la tendance la plus probable à terme), la production d'électricité d'origine nucléaire aurait besoin, pour se développer, d'un soutien des pouvoirs publics au nom, notamment, de la lutte contre le réchauffement climatique et de la défense de la sécurité d'approvisionnement qui est, d'ores et déjà, hautement stratégique. C'est précisément la décision prise récemment aux États-Unis dans le cadre de l'*Energy Policy Act* de 2005, votée fin juillet et signée par le président début août, qui contient des mesures financières visant à inciter les électriciens américains à investir dans la construction de centrales nucléaires ¹⁹.

Dans ce contexte, les enjeux de la quatrième génération sont clairement ceux d'un nucléaire durable représentant une part nettement plus importante qu'aujourd'hui de la satisfaction des besoins en énergie à l'échelle mondiale. Ceci conduit à focaliser les programmes de R&D sur des systèmes de réacteurs à neutrons rapides associés à un cycle fermé, satisfaisant en outre les préoccupations de gestion responsable des déchets et de prévention des risques de prolifération. De plus, le développement de réacteurs à caloporteur gaz à très haute température permettra d'améliorer le rendement de conversion de l'énergie primaire et d'ouvrir la voie d'une production massive d'hydrogène.

Au plan national, l'introduction d'une fraction de réacteurs à neutrons rapides lors du renouvellement du parc permettrait de se prémunir contre les risques de tension sur le marché de l'uranium, et de gérer convenablement les stocks de plutonium et d'autres actinides générés par les réacteurs de deuxième et de troisième génération. Par ailleurs, une forte participation de la France au programme international de développement des systèmes de quatrième génération doit aider son industrie à conserver son *leadership* au plan mondial.

19. La loi prévoit un système de garantie publique des emprunts contractés pour la construction de nouvelles centrales, une subvention à la production, sous forme de crédit d'impôt, de 18 dollars US par MWh produit pour les 6 000 premiers MW de centrales nucléaires mis en service (le crédit d'impôt est plafonné par an et par entreprise) et enfin la prise en charge des conséquences financières induites par d'éventuels reports de la mise en service de centrales dus à des modifications réglementaires ou à des litiges. La loi autorise aussi le gouvernement à une dépense en R&D dans le domaine nucléaire de 2,7 milliards de dollars US jusqu'en 2009.

FUTURIBLES INTERNATIONAL

Séminaires de formation

- **Jeudi 26 janvier 2006** — « Séminaire d'introduction à la veille et à la démarche prospective : concepts, méthodes et applications pratiques », animé par **Hugues de Jouvenel**, directeur général du groupe Futuribles.
- **Jeudi 2 février 2006** — « La France à l'horizon 2010-2020 : tendances lourdes et risques de rupture. Atelier de construction de scénarios contrastés », animé par **Hugues de Jouvenel**, avec la collaboration de **Geoffrey Delcroix**, **François de Jouvenel**, **Céline Laisney** et **Véronique Lamblin**.
- **Mardi 7 mars 2006** — « Les perspectives socio-démographiques en Europe. Tendances lourdes, incertitudes majeures et scénarios », animé par **Hugues de Jouvenel** et **Alain Parant**, chercheur à l'Institut national d'études démographiques (INED) et directeur d'études au sein du groupe Futuribles.
- **Mercredi 22 et jeudi 23 mars 2006** — « Méthodes et outils de la prospective stratégique », organisé en coopération avec le **LIPSOR** (Laboratoire d'investigation en prospective, stratégie et organisation) du CNAM (Conservatoire national des arts et métiers).

Table ronde

Mardi 17 janvier 2006 — « Méditerranée : les perspectives du Plan Bleu pour l'environnement et le développement », avec **Guillaume Benoît**, directeur du Plan Bleu.

Les membres de Futuribles International ayant acquitté leur cotisation sont invités aux tables rondes. Des frais de participation de 50 euros sont demandés aux personnes non membres.

Vous pouvez recevoir les invitations aux tables rondes par courrier électronique, en nous communiquant vos nom et adresse électronique, le plus lisiblement possible, à l'adresse ci-dessous.

Inscriptions et renseignements : Laurence Faupin • Futuribles International
47, rue de Babylone • 75007 Paris • Tél. 33 (0)1 53 63 37 73 • Fax 33 (0)1 42 22 65 54
E-mail : forum@futuribles.com • Site Internet : www.futuribles.com

Jean-Louis Bal et Bernard Chabot ¹

Quelle place pour les énergies renouvelables ?

UN RÔLE ESSENTIEL DANS UN CONTEXTE DE MAÎTRISE DES CONSOMMATIONS

Comme l'indique l'une des conclusions de la Mission interministérielle française sur l'effet de serre en 2004, on ne pourra réduire les émissions de gaz à effet de serre, en France, sans un effort massif en matière de consommation énergétique (économies d'énergie) ni sans un développement parallèle des énergies renouvelables.

L'aspect demande (maîtrise des consommations) est traité dans ce même numéro par Véronique Lamblin. Côté offre, dans un contexte de pénurie possible à plus ou moins long terme (vraisemblablement quelques décennies) des sources d'énergie fossiles (hydrocarbures, principalement), les énergies renouvelables (EnR) constituent, à côté du développement du nucléaire, une piste essentielle. Jean-Louis Bal et Bernard Chabot, spécialistes des EnR au sein de l'ADEME, nous présentent ici les principales caractéristiques des EnR (solaire, hydraulique, éolien, biomasse, géothermie), la place qu'elles occupent dans le monde, et plus spécifiquement en Europe et en France, ainsi que leurs perspectives de développement à moyen terme.

Distinguant bien l'apport des EnR à la production électrique, à la production de chaleur et dans le domaine des carburants, ils montrent combien ces EnR pourraient alimenter une partie non négligeable de l'offre énergétique, au travers des usages simples qui peuvent en être faits dans le domaine du logement ou des transports, par exemple. Mais cela nécessite, là encore, un certain volontarisme de la part des pouvoirs publics. L'Allemagne et le Japon, par exemple, ont investi dans cette voie avec succès ; la France, pour sa part, tarde à suivre le mouvement.

S.D.

1. Jean-Louis Bal est directeur des énergies renouvelables à l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) ; Bernard Chabot est expert senior à l'ADEME.

Qu'entend-on par « énergies renouvelables » ?

Sont considérées comme énergies renouvelables (EnR) toutes les énergies issues du soleil, directement (énergie solaire) ou indirectement (énergie éolienne, hydraulique et biomasse), l'énergie issue du magma terrestre (géothermie) et l'énergie issue de la gravitation (énergie marémotrice). Les diverses énergies que l'on pourrait tirer des océans telles que l'énergie de la houle, des courants marins ou du gradient thermique des mers, sont également issues indirectement de l'énergie solaire et font partie du champ des énergies renouvelables.

Les filières technologiques existantes seront analysées suivant les trois utilisations de l'énergie : chaleur, électricité et carburant pour le transport.

Des énergies renouvelables mais pas toujours renouvelées

Les énergies renouvelables sont théoriquement inépuisables puisque reproductibles, mais elles sont disponibles en quantité limitée à un endroit et un instant donnés. La ressource en énergie solaire, qui est la base de toutes les autres, hormis la géothermie et l'énergie marémotrice, est 12 000 fois supérieure à l'actuelle consommation d'énergie de l'humanité. Dans le cas de la biomasse, le caractère renouvelable n'est réel que si l'on veille à la pérennité de la ressource. C'est le cas en France où la croissance de la ressource végétale est supérieure à l'exploitation qui en est faite. La géothermie est, quant à elle, une ressource renouvelable issue de la désintégration d'éléments radioactifs contenus dans le noyau terrestre, mais c'est la chaleur stockée dans la croûte terrestre depuis des milliards d'années qui est exploitée, et non le flux de chaleur issu du noyau terrestre qui est relativement faible, 42 térawatts soit 4 000 fois moins que le flux d'énergie solaire. La chaleur accumulée dans la croûte terrestre représente une énergie considérable, bien supérieure aux réserves d'énergies fossiles : la quantité d'énergie exploitable par km² sur une profondeur de 10 km est en moyenne de 12,5 millions de tonnes équivalent pétrole (12,5 Mtep).

Des énergies propres, mais des impacts qu'il ne faut ni négliger ni exagérer

Les énergies renouvelables ont peu d'impacts négatifs sur l'environnement. En particulier, leur exploitation ne donne pas lieu à des émissions de gaz à effet de serre ou à des déchets dangereux. Dans le cas de la biomasse qui émet du CO₂ lors de sa combustion, la même quantité de gaz carbonique est captée pendant la croissance des végétaux.

Les EnR peuvent néanmoins avoir des impacts environnementaux localisés. Les problèmes sont connus : impact paysager pour l'énergie éolienne ; émis-

UNITÉS DE MESURE

Puissance

kW : kilowatt

MW : mégawatt = 1 000 kW

GW : gigawatt = 1 000 MW

Énergie

kWh : kilowattheure = énergie produite par un kW en une heure

MWh : mégawattheure = 1 000 kWh

GWh : gigawattheure = 1 000 MWh

TWh : térawattheure = 1 000 GWh

Le kWh est l'unité la plus courante, particulièrement dans les domaines électrique et thermique. L'autre unité également utilisée dans les bilans énergétiques est la tep, tonne équivalent pétrole :

ktep : kilotonne équivalent pétrole = 1 000 tep

Mtep : mégatonne équivalent pétrole = un million de tep

1 tep = 11 600 kWh

1 Mtep = 11,6 TWh

sions atmosphériques pour le bois combustible ; présence de contaminants dans le biogaz de décharge ; perturbation de l'écosystème local pour la petite hydraulique... Leur utilisation doit donc répondre à certains principes et réglementations pour limiter ces impacts locaux.

La superficie consommée par la production d'énergies renouvelables peut être relativement grande, mais il faut être prudent dans les comparaisons. Par exemple, la surface nécessaire à l'implantation d'une ferme éolienne est d'un km² pour huit MW, mais 99 % de cette surface restent utilisables pour d'autres fonctions telles que l'agriculture ou l'élevage.

De la même manière, il faut environ 10 m² de modules photovoltaïques pour produire un kW de puissance et 1 000 kWh d'énergie électrique par an (sous les latitudes françaises), mais ces 10 m² peuvent faire partie de surfaces ayant déjà une utilisation comme celle d'une toiture de bâtiment et la surface occupée peut alors être considérée comme nulle.

Des énergies propres mais non sans contraintes

Un élément important pour évaluer la valeur d'un type d'énergie est la puissance qui peut être considérée comme garantie par cette énergie, c'est-à-dire fournie au moment où les consommateurs en ont besoin, en particulier pour les usages de l'électricité, énergie difficilement stockable. De ce point de vue, la situation des différentes filières est extrêmement variable. La géothermie fournit une puissance garantie et peut donc fonctionner en base, alors que le solaire et l'éolien sont des énergies fluctuantes. Entre les deux, l'hydroélectricité et les bioénergies offrent plus de souplesse, avec certaines capacités de stockage. Une centrale hydraulique pourra à certaines heures

absorber les excédents de production d'autres centrales en leur permettant de fonctionner à leur puissance nominale et, donc, avec une meilleure efficacité. Le solaire et l'éolien, même s'ils fluctuent, ne sont pas aléatoires car prévisibles, et peuvent avoir une valeur en termes de puissance électrique conventionnelle évitée pour les réseaux si les pointes de consommation sont simultanées à l'occurrence de ces énergies et que le foisonnement des sources dispersées est suffisant. Ce peut être le cas du solaire et de la consommation engendrée par la climatisation, ou de l'éolien et de la pointe de consommation en hiver.

On conçoit néanmoins que le stockage de l'énergie, particulièrement électrique, même sur quelques heures, peut apporter une grande valeur ajoutée aux EnR et que cela devrait être un important thème de recherche pour les années à venir.

Un développement impossible par le seul biais du marché

En dehors de quelques segments de marché particulier et hormis l'hydro-électricité, les EnR ne sont pas encore pleinement compétitives sur un plan économique. Leur développement demandera encore un soutien financier public continu, à tout le moins tant que leurs avantages environnementaux et sociaux n'auront pas reçu de contrepartie économique ou tant que les impacts négatifs des autres énergies, notamment les émissions de gaz à effet de serre, n'auront pas été intégrés dans leurs coûts. En effet, le marché ne prend pas en compte naturellement des technologies dont les avantages économiques ne seront visibles qu'à long terme et dont les avantages sociaux, environnementaux et stratégiques ne reçoivent pas de valorisation financière.

D'autre part, les technologies EnR se caractérisent, comme le nucléaire, par un investissement élevé et de faibles frais de fonctionnement. Leur coût global actualisé, c'est-à-dire calculé sur la durée d'amortissement, est donc très sensible au taux d'actualisation qui reflète le degré de préférence de l'investisseur pour le présent par rapport au futur ².

Contribution actuelle des EnR et objectifs de développement à l'horizon 2010

En France

La contribution des énergies renouvelables représente environ 6 % de la consommation nationale en énergie primaire, situation similaire à celle de

2. Référence chiffrée utilisée pour mesurer la rentabilité socio-économique d'un investissement public, c'est-à-dire pour comparer la dépense future avec une dépense actuelle équivalente (NDLR).

Tableau 1 — Les contributions des ENR à la production d'énergie en France

	2001 (GWh)	ktep	2002 (GWh)	ktep	2003 (GWh)	ktep
Hydraulique *	80 257	–	67 571	–	65 867	–
Éolien	149	–	299	–	376	–
Solaire	13	25	15	25	19	28
Géothermie	20	128	17	128	23	129
Pompes à chaleur	–	231	–	233	–	253
Déchets urbains solides	2 390	704	2 900	779	3 285	830
Bois et déchets de bois	1 312	8 806	1 324	7 983	1 344	8 759
Résidus de récoltes	341	185	340	186	370	192
Biogaz	349	56	391	57	416	57
Biocarburants	–	339	–	363	–	400
Total	84 830	10 474	72 858	9 755	71 700	10 647
Total en ktep**	17 769		16 020		16 813	

*Y compris l'usine marémotrice de la Rance et les centrales classées dans la catégorie pompage.
 **1 GWh = 0,086 ktep, excepté pour la géothermie (0,86 ktep).

l'ensemble de l'Union européenne. Les contributions les plus élevées viennent des filières « anciennes », hydraulique et bois énergie (tableau 1).

Les usages thermiques, essentiellement le bois, fournissent environ 10,15 Mtep. Les usages électriques ont contribué en 2003 à la production de 71,7 TWh (soit 15 % de la consommation d'électricité), la contribution essentielle étant apportée par l'hydroélectricité (93 %). Enfin, les biocarburants sont aujourd'hui incorporés à hauteur de 0,4 Mtep, soit 0,8 % en moyenne dans les carburants routiers classiques. En dehors des variations de l'hydraulique dues à la pluviométrie, ces productions sont stables. Seule la production d'énergie à partir de déchets urbains solides connaît une progression régulière notable.

La loi POPE (Programmation fixant les orientations de la politique énergétique, 13 juillet 2005) a adopté un objectif global pour les énergies renouvelables à l'horizon 2010 : passer de 6 % à 10 % de la consommation en énergie primaire. Cet objectif est décliné par usages :

- 21 % de la consommation d'électricité par EnR contre 14 % actuellement ;
- 5,75 % de la consommation de carburants routiers à partir de biocarburants ;
- augmenter de 50 % la consommation en EnR thermiques (bois, solaire, géothermie).

Concernant les biocarburants, la loi d'orientation agricole propose d'avancer l'échéance à 2008, et d'adopter les objectifs 2010 et 2015 de 7 % et 10 %.

Au niveau mondial

La contribution totale des EnR, dans le monde, était estimée par BP (British Petroleum) à 18,4 % des 10 800 Mtep consommées en 2002, avec la répartition suivante : hydraulique 5,5 %, biomasse dite « traditionnelle »

10,6 % et l'ensemble des « nouvelles » EnR 2,3 %. Notons que l'estimation de la part de la biomasse « traditionnelle » est forcément très imprécise puisque la grande majorité des flux ne fait pas l'objet de transactions commerciales déclarées. Le tableau 2 résume la production d'électricité par énergies renouvelables en 2003 dans le monde.

Tableau 2 — Production mondiale d'électricité par EnR en 2003

	TWh	%
Hydroélectricité	2 631	89,5 %
Biomasse	179	6,1 %
Éolien	75	2,6 %
Géothermie	50	1,7 %
Solaire photovoltaïque	3	0,1 %
Solaire thermodynamique	0,8	0,03 %
Énergies de la mer	0,5	0,02 %
Total EnR	2 939	100 %

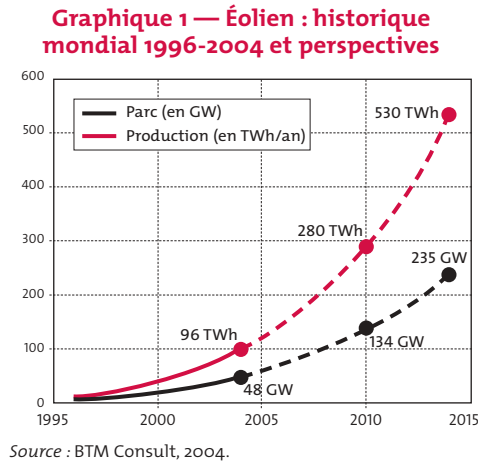
Source : AIE (Agence internationale de l'énergie).

La production d'électricité EnR représentait alors 17,3 % de la production annuelle toutes énergies confondues, soit 16 700 TWh. Cette photographie instantanée ne traduit cependant pas la dynamique des filières comme l'énergie éolienne et l'électricité photovoltaïque, analysées plus en détail ci-après.

Le développement de l'électricité éolienne

Le graphique 1 résume le développement de l'énergie éolienne dans le monde de 1996 à 2004, et son développement à 5 et 10 ans tel qu'estimé par le bureau danois spécialisé en éolien, BTM Consult ³.

Les marchés annuels correspondants sont très importants : de 8 200 MW en 2004, le marché mondial est évalué par BTM Consult à 17 600 MW/an en 2009 (avec une montée en puissance de l'éolien en mer à hauteur de 2 645 MW/an en 2009) et de l'ordre 29 000 MW/an en 2014.



Ce développement entraîne une baisse parallèle des coûts de production de l'électricité éolienne. Selon le traditionnel exercice d'évaluation des coûts

3. BTM CONSULT. *International Wind Energy Development: World Market Update 2004. Forecast 2005-2009.* Site Internet www.btm.dk, mars 2004.

de référence du ministère français de l'Industrie réalisé en 2004, le coût pour un site à 2 500 heures de fonctionnement annuel à puissance nominale, avec un taux d'actualisation de 8 %, est de l'ordre de 52 euros le MWh en 2007 et 36,5 euros le MWh en 2015, en baisse de plus de 30 %.

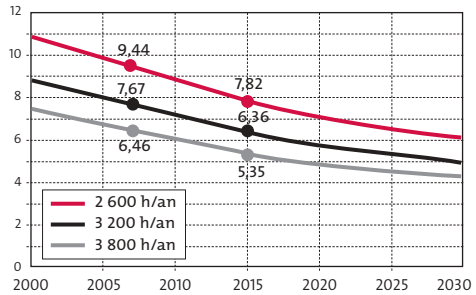
En fonction du nombre d'heures de fonctionnement annuel, il varie comme indiqué dans le tableau ci-dessous (unité : euros par MWh).

		2 000 h	2 200 h	2 400 h	2 500 h	2 600 h	2 700 h	2 800 h	3 000 h
Actualisation à 8 %	2007	64,2	58,8	54,2	52,2	50,3	48,6	47,0	44,2
	2015	44,6	40,9	37,9	36,5	35,3	34,1	33,0	31,1

Pour l'éolien en mer, les études prospectives de l'ADEME prévoient les évolutions figurant sur le graphique 2.

L'électricité éolienne terrestre apparaît donc comme très proche de la compétitivité si l'on considère que les prix de l'électricité sur le marché européen s'établissent couramment à plus de 50 euros le MWh ces derniers mois. L'éolien maritime le sera probablement vers 2015.

Graphique 2 — Coût de référence de l'énergie éolienne en mer*

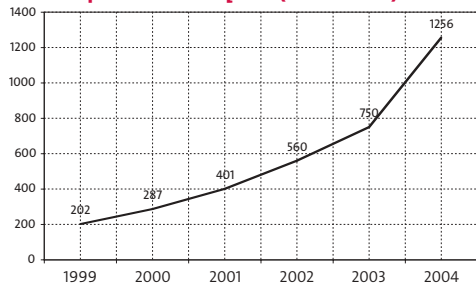


*Taux d'actualisation = 8 %, en centimes d'euro par kWh.
Source : CHABOT Bernard / ADEME, 2002.

La progression du solaire photovoltaïque

Pour l'électricité photovoltaïque (PV), le graphique 3 résume la croissance très forte du marché annuel de production des cellules photovoltaïques. Celui-ci a dépassé largement le gigawatt en 2004, pour un chiffre d'affaires consolidé de la profession supérieur à cinq milliards d'euros.

Graphique 3 — Production de cellules photovoltaïques (MwC/an*)



*MwC : mégawatt crête (la crête est l'unité de puissance d'un capteur photovoltaïque).

Source : Photon International, n° 3, mars 2005.

Le Japon domine clairement le marché avec 47 % de la production, mais l'Europe a une forte position de *challenger* avec plus de 27 %, loin devant les

États-Unis (11 %). Les ambitions du Japon sont confirmées par la publication en juin 2004 de sa « feuille de route » pour le développement des applications et de la technologie photovoltaïques⁴. On peut en tirer les informations stratégiques ci-dessous :

— Passage d'une approche « pilotage par la recherche », ces 30 dernières années, à une stratégie de pilotage par l'ouverture du marché devant déboucher sur un parc installé de 4 800 MW en 2010 (déjà plus de 1 100 MW fin 2004).

— Objectif de marché 2030 : 100 GWc installés au Japon, soit 50 % de la consommation d'électricité dans l'habitat ou 10 % de l'électricité consommée à cet horizon au Japon.

— Étapes d'objectifs de coûts du kWh électrique photovoltaïque et des modules : 2002, 35 centimes d'euro⁵ le kWh ; 2007, 22 centimes d'euro le kWh ; 2010, 17 centimes d'euro le kWh (soit le coût du kWh résidentiel) ; 2020, 10 centimes d'euro le kWh (soit le coût du kWh en tertiaire) ; 2030, 5 centimes d'euro le kWh (soit le coût du kWh pour l'industrie).

— Facteurs de baisse des coûts : augmentation de la durée de vie des systèmes à 30 ans, augmentations de rendement des modules, nouveaux matériaux.

Ces objectifs très ambitieux ne pourront que stimuler les actions déjà engagées en Europe pour développer la technologie et les marchés photovoltaïques. Selon l'Observatoire des énergies renouvelables (Observ'ER)⁶, le parc de systèmes photovoltaïques, fin 2004, en Europe, est de 1 004 MW, dont 410 MW installés durant l'année 2004. Ce marché est principalement représenté par l'Allemagne, suite à la loi sur les énergies renouvelables qui garantit sur 20 ans un tarif suffisamment rémunérateur pour les investisseurs (57,4 centimes d'euro le kWh pour les toits PV de moins de 30 kW et 44 centimes d'euro le kWh pour des systèmes de plus de 100 kW reliés au réseau).

Avec le nouveau tarif décidé en Espagne en mars 2005 (42 centimes d'euro le kWh sur 25 ans) et compte tenu du meilleur ensoleillement dans ce pays, l'expansion du marché photovoltaïque observée ces dernières années en Allemagne a des chances de se reproduire en Espagne.

Les perspectives de marché mondial du photovoltaïque ont fait l'objet de nombreuses analyses. Le groupe d'analyse et de proposition PV-TRAC (Photovoltaic Technology and Research Advisory Council), créé par la Commission européenne, évalué à 1 000 GW la puissance installée dans le monde en 2030, produisant 4 % de l'électricité mondiale. Ce scénario est implicitement

4. *PV Roadmap Towards 2030*. Tokyo : NEDO (New Energy Development Organization), juin 2004.

5. Conversion selon le taux de change 1 euro = 139,7 yens.

6. « Baromètre du solaire photovoltaïque ». *Eurobserv'ER*, n° 37, avril 2005, site Internet www.observ-er.org/s_accueil.asp.

basé sur des objectifs de baisse des coûts rapide des modules, des systèmes reliés au réseau et du kWh produit : 25 à 65 centimes d'euro le kWh en 2004, division par deux d'ici 2010 à 2015, et 5 à 12 centimes d'euro en 2030⁷.

À l'évidence, avec un décalage temporel de l'ordre de 10 à 15 ans par rapport à l'énergie éolienne, l'électricité photovoltaïque est donc déjà clairement engagée sur la voie d'un développement massif et rapide dans le monde. Les applications dans les pays en développement, même si la puissance installée est moindre, seront qualitativement très importantes puisque dans la « vision » à 2030 du PV par PV-TRAC, le nombre d'habitants des pays en développement pouvant bénéficier d'une électrification solaire PV est estimé à 500 millions (100 millions de familles).

On peut retirer de cette analyse que les perspectives de marché de l'électricité photovoltaïque, notamment pour les systèmes et centrales reliés au réseau sont bien assurées par la dynamique créée par les pays *leaders* (Japon, Allemagne et maintenant Espagne).

Autres sources d'énergie renouvelables pour l'électricité et perspectives à moyen terme

Si la réduction des coûts de l'éolien en mer et du photovoltaïque est un objectif identifié de longue date, dont la faisabilité ne fait guère de doute, il faut insister sur l'importance tout à fait stratégique de disposer de technologies pouvant produire de l'électricité de façon relativement abondante et garantie. La géothermie des roches profondes pourrait apporter de la souplesse à la gestion d'un système énergétique beaucoup plus largement basé sur les EnR.

Les roches du sous-sol sont en permanence réchauffées par le flux thermique venant du centre de notre planète. À titre d'exemple, dans le cas d'une roche à 200°C, l'énergie libérée par un refroidissement de 20°C pourrait produire de 10 à 15 MW électriques pendant 20 ans, à raison de 8 000 heures par an, ou permettre de distribuer, sur la même période, près de 100 MW thermiques. Les régions intéressantes sont celles sous lesquelles la température augmente en fonction de la profondeur plus vite que la moyenne et où les conditions géologiques permettent de développer des méthodes efficaces d'extraction de la chaleur.

C'est ainsi qu'un programme de recherche européen sur l'exploitation de la chaleur des roches fracturées chaudes a été initié en Alsace. Le site expérimental, à quelque 50 km au nord de Strasbourg, est considéré comme repré-

7. PV-TRAC. *A Vision for Photovoltaic Technology for 2030 and Beyond*. Bruxelles : Commission européenne, 2004, site Internet <http://europa.eu.int/comm/research/energy/pdf/vision-report-final.pdf>.

sentatif des conditions qui règnent dans les régions de « graben » où les roches profondes sont « naturellement » fissurées. De telles régions couvrent de vastes étendues en Europe et dans le monde, dont environ 30 000 km² sous la seule surface du territoire français métropolitain.

Un site pilote scientifique prévu pour fournir 5 MW électriques et 20 MW thermiques est en cours d'installation actuellement, sous la responsabilité d'un groupement européen d'intérêt économique comprenant notamment EDF (Électricité de France).

En cas de succès, un prototype industriel de 25 MW électriques sera réalisé, avant de passer à la construction d'unités en série. Il comprendra un ensemble de neuf puits (trois puits d'injection, six puits de production) dont les têtes seront regroupées sur une seule plate-forme géothermique.

Même si l'on admet comme probable le succès scientifique et technique du pilote en cours de construction puis du prototype qui suivra, les futurs développements industriels de l'exploitation de la chaleur des roches profondes dépendront de la compétitivité des coûts de production. Les estimations actuelles conduisent à un prix de revient de l'électricité produite compris entre 0,05 et 0,09 euro par kWh.

Quel taux de pénétration pour le solaire photovoltaïque et l'éolien, et à quel prix ?

L'énergie éolienne et l'énergie solaire sont en effet fluctuantes. Même si elles sont de mieux en mieux prévisibles, elles ne peuvent être appelées en fonction de la demande. S'agissant du système électrique, la grande hydraulique, la bioélectricité et la géothermie fourniraient une production de base et une souplesse d'exploitation, tandis que les énergies intermittentes comme l'éolien et le solaire pourraient apporter une relative abondance, différentes formes complémentaires de stockage pouvant être envisagées (hydrogène, stockage thermique haute température, gestion de la demande, etc.). Il faut aussi développer de meilleurs outils de prévision des énergies éolienne et solaire, tenant compte du foisonnement de ces ressources de la Méditerranée au cercle polaire, de même que des réseaux de transport interconnectés qui permettent de profiter de ces foisonnements.

La question du taux de pénétration maximal de l'énergie éolienne en pourcentage de l'énergie électrique produite annuellement sur un réseau a été souvent évoquée, aussi bien par les promoteurs que par les opposants de la filière.

On peut noter que des taux de pénétration élevés sont déjà constatés dans certains pays ou certaines régions : plus de 20 % au Danemark, plus de 30 %

dans trois *Länder* allemands. Dans le cas de l'Allemagne, une étude sur la faisabilité d'un taux de pénétration éolien de 15 % en 2015 (soit 36 GW et une production de 77 TWh/an, dont 42 % à partir d'installations en mer) a été publiée en 2005 après validation par le comité de suivi auquel participaient les compagnies d'électricité et les gestionnaires des réseaux de distribution⁸. Les principaux résultats sont très positifs. Tout d'abord, pour assurer l'équilibre offre / demande d'électricité, de nouvelles capacités de production classiques ne seraient pas nécessaires. Ensuite, le réseau électrique haute tension n'aurait besoin d'être étendu ou rénové que de 5 % au maximum, soit 850 km. Enfin, les coûts et surcoûts liés à cette production éolienne massive seraient acceptables. Pour une famille consommant 3 000 kWh/an, ce surcoût serait de moins de 15 euros par an, soit l'équivalent d'environ 10 litres d'essence au coût actuel à la pompe.

De son côté, l'Agence internationale de l'énergie (AIE) a résumé, dans une étude publiée en 2005⁹, les combinaisons de solutions qui peuvent permettre un taux de 15 % à 20 % de pénétration des énergies variables. Certaines ont un coût nul, comme l'aménagement des règles de fonctionnement des marchés de l'électricité pour ne pas pénaliser l'éolien. Ainsi, la règle de délai minimum d'annonce du futur niveau de production d'une heure au Royaume-Uni est compatible avec des niveaux très élevés de précision de la prédiction de la production éolienne — moins de 2 % d'erreur à une heure (contre 9 % à 24 heures), soit dans la marge d'erreur de la prédiction de la demande : 1 % à 5 %. D'autres sont déjà utilisées, comme le recours au pompage-turbinage en Europe du Nord et aux États-Unis. Enfin, une planification intelligente des nouveaux moyens de production peut faciliter la pénétration des énergies renouvelables : utilisation du foisonnement entre gisements éoliens (types de gisement, dispersion géographique, échanges interfrontaliers) et entre filières d'énergies renouvelables (biomasse, en partie « dispatchable » ; géothermie en base ; solaire complémentaire entre été et hiver...). En rajoutant des actions sur la gestion de la demande d'électricité, ces combinaisons de solutions permettent d'aller au moins jusqu'à 15 % de pénétration sans création de nouveaux moyens de production classiques spécifiquement dédiés.

Cette conclusion est aussi valable pour la France, où une étude du Réseau de transport de l'électricité a conclu que pour 10 GW éoliens en France en 2010, les réserves de puissance actuelles ne devraient être augmentées que de 600 MW, notamment du fait que l'aléa induit par ce parc éolien est du même ordre que celui engendré par les variations de la demande dues aux écarts de température. Notons au passage que ces réserves de puissance supplémentaires peuvent être des stations de pompage-turbinage non émettrices de CO₂. Enfin, les coûts de ces mesures compilés dans les différentes études

8. DENA Grid Study, téléchargeable sur le site Internet www.dena.de.

9. AIE. *Variability of Wind Power and Other Renewables*. Paris : AIE, 2005.

confirment une baisse des estimations vers moins de quelques dixièmes de centime d'euro par kWh éolien à un maximum de 0,6 centime d'euro par kWh (étude britannique pour 20 % d'éolien et biomasse en 2020).

Ainsi, l'argument des limites « naturelles » de pénétration de l'énergie éolienne sur les réseaux électriques, souvent cité pour conclure à la « marginalité éternelle » de cette filière, s'est progressivement révélé artificiel, depuis 20 ans. Certes, aller jusqu'à 15 % puis 20 % de pénétration en énergie éolienne nécessite de la matière grise, de la bonne volonté réciproque des producteurs éoliens et des gestionnaires de réseaux, et un peu de dépenses d'investissement et de gestion sur le reste des systèmes électriques. Mais ces solutions techniques et organisationnelles, et leurs coûts associés n'ont rien d'impossible, de réhibitore ou d'extravagant, surtout en prenant en compte les coûts futurs des énergies conventionnelles et de la lutte contre le changement climatique.

Dans le cas français, aller au-delà de 15 % à 20 % d'énergies variables n'est pas une question d'actualité car les énergies sans CO₂ (nucléaire et hydraulique) représentent déjà 90 % de la production électrique. En revanche, il serait intéressant d'étudier à quelles conditions le solde de la production pourrait être garanti par un bouquet de nouvelles EnR, dans le cadre d'une politique volontariste de maîtrise des consommations.

Les usages thermiques de l'énergie

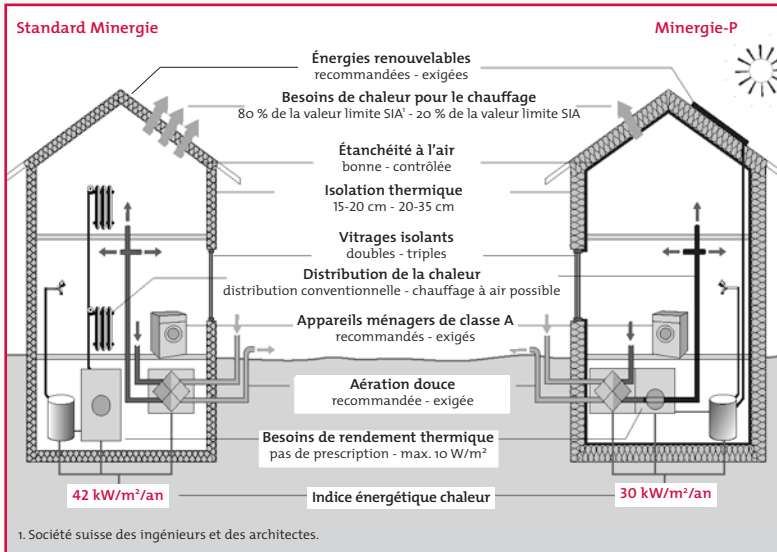
Les usages thermiques à basse température, qui représentent en France le tiers des consommations d'énergie finale, sont ceux qui peuvent être le plus facilement satisfaits par l'utilisation des EnR et qui sont directement à portée de décision du citoyen. On redécouvre à cette occasion tout l'intérêt de la bonne conception de l'architecture et de la construction, ainsi que de la valorisation des énergies locales (bois, solaire et géothermie), pour lesquels des technologies parfaitement maîtrisées sont disponibles : chaudières à bois, planchers solaires et pompes à chaleur géothermiques.

Les usages thermiques dans l'habitat

L'utilisation directe du rayonnement solaire peut viser au chauffage de l'eau sanitaire, mais aussi, comme le bois énergie dont il peut être complémentaire, au chauffage de l'habitat. Le bon ensoleillement du territoire, y compris dans le nord du pays, permet de couvrir de 40 % à 70 % des besoins cumulés en eau chaude sanitaire et en chauffage.

Cela doit s'intégrer dans une démarche plus globale de proposition des technologies performantes dans l'habitat : un logement neuf bénéficiant de chauffage solaire, et des concepts et produits actuels de l'architecture climatique,

LE LABEL MINERGIE



Une maison Minergie permet aux habitants de profiter d'un niveau élevé de confort. Elle offre une protection contre les bruits, des tempé-

tures constantes et plaisantes, de l'air frais, sans poussière. Elle n'utilise qu'un tiers de l'énergie consommée par une structure traditionnelle.

Source : site Internet www.minergie.ch.

peut voir ses consommations énergétiques réduites à moins de 30 kWh/m²/an contre 250 kWh/m²/an pour la moyenne des logements français neufs en 2000. En réhabilitant des logements anciens avec les mêmes produits et services, il est possible de ramener leur consommation à 50 kWh/m²/an. Il est donc techniquement et économiquement possible, en combinant efficacité énergétique et usage de l'énergie solaire, de diviser la consommation totale des logements d'un facteur supérieur à quatre. Il en est de même pour le secteur du bâtiment tertiaire. Ces objectifs de performance ne sont pas purement théoriques, comme le démontre l'étonnante réussite du label Minergie en Suisse. Ce label exige un maximum de 45 kWh/m²/an voire 30 kWh/m²/an pour le label Minergie P. En 2004, le quart des constructions neuves en Suisse, soit 931 593 m², répondait à l'un de ces labels ¹⁰.

10. Voir aussi MAUGARD Alain, VISIER Jean-Christophe et QUÉNARD Daniel. « Le bâtiment à énergie positive ». *Futuribles*, n° 304, janvier 2005, pp. 39-55 (NDLR).

Par ailleurs, la France dispose de plusieurs types de ressources géothermales. Les ressources basse enthalpie (de 50°C à 100°C) sont principalement situées dans les Bassins parisien et aquitain, à des profondeurs comprises entre 600 et 2 000 mètres. Elles se valorisent directement à des fins de chauffage.

Les ressources à très basse enthalpie (inférieure à 50°C), présentes sur la quasi-totalité du territoire dans des aquifères peu profonds, se valorisent à l'aide de pompes à chaleur (PAC), sachant que les PAC peuvent être réversibles et assurer la climatisation en période chaude en restituant les calories au sous-sol. Les PAC géothermales réversibles destinées au chauffage et à la climatisation sont des appareils très performants sur le plan énergétique (coefficient de performance pouvant aller jusqu'à cinq, c'est-à-dire qu'elles peuvent fournir en énergie thermique jusqu'à cinq fois l'énergie électrique qu'elles absorbent).

En France, 40 % des ménages habitant une maison individuelle se chauffent au bois, totalement ou partiellement. Cela représente en énergie primaire de l'ordre de 7,3 Mtep et en énergie utile 20 % des besoins thermiques de l'ensemble du parc d'habitat individuel. D'autre part, environ 1 500 chaufferies collectives et industrielles consomment de leur côté un peu plus d'une Mtep de bois. Cette consommation entraîne un prélèvement de 35 millions de m³ de bois. Le potentiel théorique de prélèvement supplémentaire sur le seul gisement forestier est estimé, suivant une récente étude de l'ADEME ¹¹, à 7,2 Mtep pour la récolte des rémanents liés à l'exploitation actuelle du bois d'œuvre. Un second gisement supplémentaire de 4,8 Mtep pourrait être exploité si les prélèvements de bois d'œuvre étaient intensifiés, sans outrepasser la croissance de la forêt.

Une autre étude de l'ADEME, encore à publier, montre que dans un scénario dit « Facteur 4 », où la consommation des bâtiments serait réduite et les appareils actuels de chauffage au bois progressivement remplacés par des appareils performants déjà existants sur le marché, le chauffage au bois continuerait à fournir 20 % des besoins thermiques de l'habitat individuel en 2020, malgré l'accroissement de ce parc, tout en réduisant la consommation de bois en énergie primaire à 4 Mtep. Cette réduction libérerait donc 3,3 Mtep d'énergie primaire pour d'autres usages décrits plus loin.

Des expériences et développements en cours en Europe, se dégagent également une définition claire du concept de « maison passive » : il s'agit d'un bâtiment qui se démarque fortement des bâtiments « à hautes performances énergétiques », qui eux-mêmes se démarquent déjà drastiquement des bâtiments réalisés suivant les réglementations thermiques du bâtiment les plus récentes, avec typiquement moins d'environ 60 kWh/m²/an de pertes ther-

11. Consultable sur le site Internet www.boisenergie.ifn.fr/index.php.

miques au lieu de 100 à 120 kWh/m²/an. Ainsi, les « maisons passives » sont en dessous de 15 à 20 kWh/m²/an de pertes thermiques (après récupération de la chaleur de l'air extrait), ce qui permet de les compenser par les apports solaires directs, ceux du métabolisme des occupants, et des transformations en chaleur fatale de la consommation d'électricité des lampes et des appareils ménagers.

LES SOLUTIONS TECHNIQUES DANS LES « MAISONS PASSIVES »

En seulement quelques années de réflexion et de pratiques, la convergence des solutions pour assurer les performances correspondant au standard implicite de « maisons passives », est impressionnante et rassurante, puisqu'elle peut donner lieu à une simplification de la conception et de la réalisation des composants et des systèmes. La philosophie générale est simple : réduction drastique des besoins énergétiques et fourniture de ceux-ci en priorité par des moyens passifs :

— Conception générale : bâtiments compacts, bien orientés (pièces de vie au sud) ; portes peu nombreuses ; petites fenêtres en façade nord (où se trouvent des pièces « tampons »), est et ouest ; ensoleillement garanti ; plantations adaptées : protection du vent en façades nord, arbres à feuilles caduques en façade sud ; protections solaires ; proximité de transports en commun...

— Sur-isolation : fondations, planchers, toiture, murs, élimination de tous les ponts thermiques.

— Fenêtres à triple vitrage rempli d'argon, face interne à réflexivité sélective, transparence assurant un gain solaire élevé.

— Étanchéité parfaite à l'air du bâtiment, ventilation assistée permettant un renouvellement de 0,3 à 0,5 volume par heure, par de l'air neuf filtré et réchauffé par l'air extrait dans un échangeur sans mélange à plus de 80 % de rendement. Souvent, cet air neuf peut transiter par un « puits provençal » :

circuits en parallèle de quelques dizaines de mètres de tuyaux cimentés de quelques décimètres de diamètre, enterrés à plus d'un mètre de profondeur, permettant de préchauffer l'air en hiver et de le rafraîchir en été (dans ce dernier cas, l'échangeur air / air possède un *by-pass* permettant à l'air entrant de garder sa fraîcheur).

— Eau : équipements à faible pression et débit, alimentation directe en eau chaude des machines à laver, fourniture d'eau chaude par chauffe-eau solaire intégré au bâtiment. L'appoint en hiver peut être électrique ou thermodynamique (micropompe à chaleur).

— Éclairage : part d'éclairage naturel la plus importante possible, éclairage électrique à très faible consommation (lampes, luminaires, disposition, programmation...).

— Électricité spécifique : appareils à très faibles consommations (au minimum A, A+, voire A++), d'une part pour rester dans la logique de maîtrise des consommations d'énergie ; d'autre part pour éviter les phénomènes de surchauffe en été.

Cette convergence de ces solutions techniques pour définir et construire des « maisons passives » éprouvées peut donc, dans le cas de la France, permettre des économies de temps et d'argent : inutile de réinventer ce qui a résulté de ces années de mises au point, de réalisations et de retours d'expérience dans divers pays européens.

J.-L.B.

À quels prix ?

Un prix qui profite d'un « effet tunnel » : cette expression imagée résume bien pourquoi il est intéressant de passer du concept de bâtiment à haute performance énergétique à un bâtiment « passif ». Quand les pertes thermiques diminuent, le coût de la construction augmente, mais lorsque l'on arrive dans la zone des 10 à 20 kWh/m²/an, du fait qu'il n'y a plus besoin de système de chauffage (celui-ci étant assuré par les apports solaires passifs et le métabolisme des habitants), le coût de construction diminue brusquement, et les coûts d'exploitation et d'entretien-maintenance du poste « chauffage » disparaissent.

L'effet tunnel se traduit donc par un coût global actualisé de la construction et de l'utilisation de la maison passive qui tombe instantanément bien en dessous de celui de la maison à haute performance énergétique. En revanche, aller en dessous de cette limite de 10 à 20 kWh/m²/an de déperditions thermiques fait s'envoler le coût de la construction, sans aucun avantage en économies de chauffage, puisque celui-ci n'existe plus !

Pour une réalisation de 20 maisons « sans chauffage » à Göteborg (Suède)¹², les surcoûts et gains par appartement ont été constatés :

- Isolation renforcée : + 1 650 à + 2 200 euros.
- Échangeur air / air : + 1 100 à + 2 200 euros.
- Fenêtres (triple vitrage, argon, une couche sélective) : + 1 650 à + 2 200 euros.
- Total des surcoûts « économies d'énergie thermique » : + 4 400 à + 6 600 euros.
- Économie due à l'absence de chauffage : - 4 400 à - 5 500 euros.
- Équipement électrique très hautes performances : + 1 100 euros.
- Chauffe-eau solaire : + 2 200 euros.

Notons que ces nouveaux concepts de « maisons passives » permettent également d'éviter la climatisation active par l'usage des protections solaires, notamment par les débords de toiture, voire par le passage du renouvellement d'air par un puits provençal (voir encadré précédent). Les chaleurs fatales issues des équipements électriques, peu élevées du fait de la performance de ces équipements, sont facilement évacuées par la ventilation contrôlée.

Des résultats similaires ont été obtenus pour des bâtiments tertiaires¹³. Une stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le secteur du bâtiment, résidentiel ou tertiaire, pourra donc s'articuler sur la nécessaire combinaison de l'efficacité énergétique et l'usage des énergies renouve-

12. *Houses without Heating Systems: 20 Low Energy Terrace Houses in Gothenburg*. Brochure téléchargeable sur le site Internet www.ebd.lth.se/avd%20ebd/main/Gothenburg/Info.htm.

13. WAGNER SOLARTECHNIK : site Internet www.wagner-solartechnik.de.

lables, avec des principes différents suivant que l'on s'adresse aux bâtiments existants (60 % à 70 % des bâtiments de 2050 existent déjà aujourd'hui) ou aux bâtiments encore à construire (30 % à 40 % des bâtiments de 2050). Les énergies pouvant être distribuées par réseau, géothermie, bois, biogaz, chaleurs fatales, doivent être utilisées pour alimenter des bâtiments existants aux consommations réduites. Les chauffe-eau solaires et les poêles / inserts bois peuvent être un appoint intéressant pour tous les logements où il est physiquement possible de les installer (bonne orientation, conduit de fumée). Dans les bâtiments neufs aux performances décrites précédemment, il n'est plus nécessaire de recevoir des apports thermiques très élevés et l'arsenal « pompes à chaleur, poêles / inserts bois, solaire thermique » peut assurer la quasi-totalité des besoins thermiques, les ressources énergétiques étant disponibles, et les technologies fiables et performantes.

Transport : les usages carburants des EnR

En dehors des cas où les moyens de transport sont mus par l'électricité, auquel cas l'on est renvoyé à la problématique de la production d'électricité, le seul apport des EnR à ce secteur est dû aux biocarburants. On appelle biocarburants les carburants liquides ou gazeux produits à partir de matières organiques végétales ou animales.

Les biocarburants, leur usage et la faisabilité des objectifs 2010

La Directive européenne 2003/30 énumère 10 biocarburants différents dont certains, principalement les éthers, ne sont pas exclusivement produits avec des matières premières renouvelables. Il s'agit du bioéthanol, du biodiesel (esters d'huile végétale), du biogaz, du biométhanol, du biodiméthyl-éther, du bio-ETBE (éthyl ter-butyl éther), du bio-MTBE (méthyl ter-butyl éther), des biocarburants synthétiques, du biohydrogène et des huiles végétales brutes.

En France, seules deux utilisations ont été développées à ce jour :

— Le bioéthanol et plutôt son dérivé, l'ETBE (éther), en mélange aux essences (80 900 tonnes d'éthanol consommées en 2004). Cette production est assurée à partir de betteraves et de blé (21 750 hectares mis en culture en 2004), et de quatre unités industrielles de transformation d'ETBE.

— Un dérivé des huiles végétales (ester méthylique) en mélange aux gazoles (324 000 tonnes d'esters consommées en 2004). Cette production est assurée pour l'essentiel à partir de colza (263 000 hectares mis en culture en 2004) et de quatre unités industrielles d'estérification.

Ces biocarburants ne sont pas utilisés purs en France. Ils sont principalement introduits en faible quantité dans les essences et gazoles, en tant que composants de formulation aux qualités techniques reconnues et pour leur contribution directe ou indirecte à la réduction de certaines émissions polluantes. Ils peuvent aussi être mélangés, en tant que cocarburants, jusqu'à 30 %, pour être utilisés dans des flottes captives (bus, véhicules utilitaires...). C'est notamment le cas de l'ester d'huiles végétales (diester).

En fonction des consommations prévues en 2010, il faudrait à cet horizon, pour satisfaire l'objectif de 7 % des carburants routiers, produire de l'ordre de 900 000 tonnes d'éthanol et 2 600 000 tonnes de diester. Les surfaces agricoles nécessaires seraient de 270 000 hectares (blé et betteraves) pour le colza et de 1 700 000 hectares pour le diester (colza principalement), soit un peu plus que les surfaces en jachère (1 500 000 hectares) mais bien moins que les surfaces consacrées aux cultures d'exportation. Il n'y a donc pas de problèmes de faisabilité agricole ¹⁴.

Peut-on aller au-delà des objectifs 2010 ?

En France, le potentiel de biomasse encore mobilisable pour l'énergie, en plus des 10 Mtep déjà utilisées, est supérieur à 30 Mtep (les 12 Mtep encore mobilisables en forêt évoquées plus haut, les déchets agricoles et les possibles cultures énergétiques) dont environ 80 % sont constitués par la partie lignocellulosique de la biomasse. Or, si l'on sait produire des biocarburants à partir des réserves de la plante, on ne dispose pas, à l'heure actuelle, de technologies pour la conversion industrielle de la biomasse lignocellulosique en carburants.

La lignocellulose — schématiquement les tissus de soutien des organes végétaux (tiges, troncs, feuilles...) — représente le gisement en biomasse végétale le mieux réparti et le plus important sur le territoire national ou européen. Cette ressource peut être caractérisée selon la typologie suivante : les résidus secs d'exploitation agricole et forestière, les produits de l'exploitation forestière ou les cultures dédiées.

Pour convertir cette matière lignocellulosique, deux voies apparaissent possibles : la thermochimie et la biologie. La voie thermochimique met en œuvre des procédés tels que la combustion, la pyrolyse, la gazéification et la conversion du gaz de synthèse. Ces filières sont composées d'un enchaînement de technologies qui, pour l'essentiel, se sont développées jusqu'à présent dans le cadre de la production de chaleur et d'électricité. À titre d'exemple, la gazéification permet de transformer la biomasse en un mélange gazeux riche

14. Voir aussi CHOPPLET Marc, THOMAS Daniel. « Vers des alternatives végétales. L'émergence d'une nouvelle bioéconomie ». *Futuribles*, n° 295, mars 2004, pp. 5-18 (NDLR).

en $\text{CO} + \text{H}_2$. Ce gaz de synthèse peut ensuite être converti, après purification, en carburant liquide (gazole).

En ce qui concerne la voie biologique, les grandes étapes du procédé qui vise à la production sont le prétraitement de la biomasse, la production d'enzymes et l'hydrolyse enzymatique de la cellulose, et la fermentation éthanologique des hexoses et des pentoses. Les deux verrous majeurs sont le manque d'efficacité de l'hydrolyse enzymatique et les mauvais rendements de conversion des pentoses issus de la fraction hémicellulosique.

Ce sont là les deux grands axes du Programme national de recherche sur les bioénergies qui vient d'être adopté par l'Agence nationale de la recherche, en France, et qui vise l'horizon 2010 pour disposer de technologies industriellement exploitables.

La biomasse entre chaleur, électricité et carburants

La biomasse ne résoudra pas, à elle seule, les problèmes d'approvisionnement en énergie et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, 40 Mtep disponibles dans un pays tel que la France, qui en consomme 275, c'est une marge de manœuvre appréciable dont il conviendra d'arbitrer entre les différents usages, chaleur, électricité et carburants, pour en tirer le meilleur parti.

Dans l'état actuel des technologies, la production d'électricité seule apparaît réellement comme un gaspillage de ressources, les rendements de conversion de la combustion en chaudière suivie de production de vapeur alimentant une turbine sont de l'ordre de 20 %. Même en supposant que les technologies de gazéification permettent dans les prochaines années d'atteindre 40 % de conversion électrique, la cogénération semble une meilleure voie pour valoriser au mieux une ressource limitée. L'usage chauffage, comme évoqué précédemment, doit en premier lieu être modernisé, particulièrement dans l'habitat individuel où le même service pourrait être rendu en utilisant deux fois moins de biomasse. Parallèlement, il devra être développé sur des usages collectifs et industriels.

L'usage qui devrait donc être prioritaire si les promesses de la production de carburants lignocellulosiques se confirment, c'est bien celui de substitution aux carburants fossiles dans les transports. Il n'y a pas aujourd'hui d'autres possibilités réalistes de substitution à court et à moyen terme. La partie de la ressource forestière utilisée à des fins énergétiques n'est qu'un sous-produit de l'exploitation forestière et, pour augmenter les prélèvements énergétiques, il faut en premier lieu augmenter l'exploitation du bois d'œuvre, ce que permet parfaitement la sous-utilisation actuelle de la croissance de la forêt française. Un usage accru du bois dans la construction aurait alors une cohéren-

ce parfaite avec une politique de valorisation énergétique de la biomasse. Les besoins en énergie à la construction seraient réduits, du carbone serait stocké, les performances thermiques des bâtiments s'en trouveraient améliorées et la disponibilité de la biomasse énergie augmentée. Un plan d'action biomasse serait une vraie stratégie gagnant-gagnant.

*
*
*

Selon le rapport de la MIES (Mission interministérielle sur l'effet de serre) sur la « division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici à 2050 » (mars 2004), « il n'y a pas de division par quatre des émissions possible sans effort massif d'économies d'énergie et de développement des énergies renouvelables ¹⁵ ». Dans les scénarios à 2050 étudiés, la part des EnR varie de 32 à 75 Mtep, contre 18 Mtep actuellement, dans une consommation en énergie primaire allant de 187 à 400 Mtep.

Les ressources en énergies renouvelables, particulièrement l'énergie solaire, sont immenses, physiquement bien supérieures aux besoins énergétiques. Les technologies sont aujourd'hui, pour la plupart, déjà disponibles et fiables, ou ne nécessitent que des progrès en termes de rentabilité, qui viendront au moins autant du développement du marché que des efforts de recherche-développement. Les taux de pénétration envisagés à l'horizon 2050 ne demandent aucun saut technologique mais une politique incitative est indispensable pour guider le marché vers ces objectifs d'intérêt collectif que sont la préservation de l'environnement et la sécurité d'approvisionnement. Pour qu'ils soient atteints, le couplage maîtrise des consommations et production renouvelable est indispensable. La partie consacrée aux usages thermiques le démontre et la disponibilité limitée de biomasse pour l'usage carburant le confirme. Il en est de même pour l'électricité, pour laquelle les timides progrès actuels des EnR sont plus que compensés par l'accroissement des consommations. La hausse des prix de l'énergie, la conscience de chacun de l'imminence de l'épuisement progressif des ressources et des impacts du changement climatique, faciliteront la mise en œuvre de politiques publiques volontaristes.

15. RADANNE Pierre. *La Division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050*. Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004.

Benjamin Dessus ¹

Prospective, futurologie énergétique et principe de réalité

La crise énergétique menace : s'ils divergent sur l'horizon auquel elle pourrait survenir, la plupart des scientifiques s'accordent sur le fait qu'une pénurie de ressources fossiles devrait se produire d'ici la fin du siècle. Face à cette menace, certains proposent de faire confiance à la technologie pour espérer voir émerger de nouvelles solutions du côté de la production d'énergie (utilisation de l'hydrogène, fusion nucléaire...) : « des utopies technologiques », selon Benjamin Dessus. D'autres essaient de réfléchir aux évolutions nécessaires en termes de modes de vie et donc de consommation pour que ceux-ci soient en adéquation avec les ressources existant à divers horizons temporels (démarche systémique), montrant ainsi quelles sont les marges de manœuvre.

Benjamin Dessus, militant de longue date en faveur de politiques de maîtrise de la consommation d'énergie, présente les grandes lignes du débat relatif aux perspectives énergétiques et de maîtrise des émissions de CO₂. Le pire (l'emballement du changement climatique), nous dit-il, est probable mais pas inéluctable ; il existe une voie de sortie : non pas, d'abord, la mise en place de nouveaux moyens de production supposés moins dangereux pour l'environnement, parfois utopiques, mais la mobilisation collective de tous les citoyens en faveur d'un changement dans leurs habitudes de consommation et pourquoi pas, à plus long terme, en faveur d'une transformation du système de production.

S.D.

1. Association Global Chance.

Avec la montée de 30 % du prix de l'essence à la pompe en quelques mois en France et de plus d'un facteur deux aux États-Unis (elle n'y est pas taxée), il n'est pas étonnant que le problème de l'énergie refasse surface, d'autant que la liaison énergie / renforcement de l'effet de serre / réchauffement du climat est maintenant bien intégrée dans nos esprits. Dans un monde où le pétrole, synonyme de l'explosion de la civilisation automobile, est encore roi, l'interrogation principale porte bien évidemment sur l'échéance de la pénurie de carburant et les chances de l'éviter grâce aux « énergies de substitution » diverses qu'il devient urgent de mettre en place.

Classiquement, on passe en revue l'ensemble des ressources énergétiques de la planète, qu'elles soient fossiles (les charbons, les pétroles conventionnels ou non, le gaz naturel mais aussi les hydrates de gaz), fissiles (uranium, thorium, etc.) ou renouvelables (solaire, hydraulique, éolien, biomasse, géothermie, etc.²). On fait un nouveau point sur les réserves prouvées, sur les ressources ultimes, sur l'état des techniques de production, sur les problèmes d'environnement spécifiques à chacune des filières. Munis de ces bagages, on réinterroge un avenir qui ne s'annonce guère brillant, avec un

charbon frappé d'interdit pour cause de CO₂, un pétrole en voie d'extinction, un gaz naturel et un uranium qui pourraient bien suivre quelques dizaines d'années plus tard, et un ensemble d'énergies renouvelables dont chacun se plaît à louer les nombreuses vertus mais en reporte l'utilisation massive aux calendes grecques.

Le bouclage du bilan de l'avenir à moyen terme apparaît bien difficile : on évoque bien des « économies d'énergie », dont chacun reconnaît volontiers l'importance (comme pour les renouvelables) mais pour en renvoyer rapidement la responsabilité au seul consommateur sous le prétexte des difficultés insurmontables de mise en œuvre de politiques publiques pérennes et efficaces dans ce domaine³.

Alors pour sortir de l'impasse sans trop souffrir et plutôt que s'interroger un instant sur les fondements de la société productiviste, il reste à explorer l'immense domaine des ruptures technologiques.

Prônées par des communautés scientifiques passionnées ou tout simplement en quête de crédits, avec le soutien intéressé des *lobbies* industriels, mais aussi par les politiques dans leurs déclarations⁴, ces réponses éventuelles nous sont pré-

2. Certains n'hésitent pas à y rajouter l'hydrogène, pourtant absent à l'état libre sur notre planète et qui, malgré son intérêt potentiel comme vecteur énergétique (comme l'électricité), ne saurait en aucun cas être confondu avec une ressource énergétique.

3. On en possède un très bel exemple dans la loi sur l'énergie adoptée par l'Assemblée nationale française cet été 2005, qui après un plaidoyer convaincant sur la priorité absolue de la maîtrise de l'énergie, et tout particulièrement dans les transports, se caractérise par une absence criante de toute mesure publique concrète dans ce domaine, pour se consacrer à la relance du nucléaire.

4. Comme celles qui ont salué la décision de la construction d'ITER (*International Thermonuclear Experiment Reactor*) à Cadarache.

sentées comme des éléments essentiels de bouclage du bilan énergétique futur, et font du coup apparaître les tensions et difficultés actuelles comme conjoncturelles. Ne reste plus alors qu'à assurer le financement de la recherche et du développement pour que la technologie soit au rendez-vous à temps pour assurer les marges de manœuvre indispensables.

Le but de cet article est d'y regarder d'un peu plus près sur plusieurs aspects.

Prospective ou futurologie énergétique ?

Devant les problèmes énergétiques qui nous guettent, on trouve deux types de démarche, celle de la prospective systémique et celle de la futurologie technologique.

La prospective systémique tente de mettre en scène des images de nos sociétés à des horizons plus ou moins lointains, d'en dessiner les modes de vie et de consommation, d'en imaginer les infrastructures dans lesquelles les services principaux (urbanisme, transports, production manufacturière, etc.) seront rendus, et d'en déduire enfin la nature et les quantités des consommations d'énergie nécessaires à leur fonctionnement. C'est à ces images raisonnées, diversifiées mais cohérentes des besoins énergétiques que sont alors confrontées les différentes ressources énergétiques et technologies potentiellement mobilisables, avec une attention particulière aux problèmes de dynamiques temporelles et d'environnement (effet de serre, déchets nucléaires, etc.) pour dessiner des images de systèmes

énergétiques envisageables à différents horizons, avec leurs avantages, leurs limites et leurs inconvénients divers.

La futurologie technologique s'intéresse principalement aux ruptures technologiques susceptibles de révolutionner les modes de production (ou plus rarement de consommation) énergétiques à plus ou moins long terme : fusion thermonucléaire, civilisation de l'hydrogène, stockage du CO₂ dans le sous-sol, en sont des exemples typiques. On s'y penche principalement sur la description des conditions d'émergence de ces nouvelles technologies (efforts de recherche à accomplir, verrous technologiques ou scientifiques à faire sauter, etc.), on suppose leur date d'apparition sur le marché, l'ampleur des marchés potentiels, etc.

En revanche, l'adéquation de la technologie aux divers besoins des différentes sociétés au moment de leur apparition (en termes économiques et sociaux en particulier) fait rarement l'objet d'une discussion, comme s'il s'agissait d'une sorte de « technologie hors sol ». Le pari implicite est que l'apparition de la nouvelle technologie va rendre très rapidement obsolètes les technologies existantes à la même époque, qu'elle ne rencontrera pas de concurrence de la part d'autres innovations et résoudra dans des conditions économiques, sociales et environnementales bien plus satisfaisantes les questions posées. Bref, la futurologie technologique se détourne largement de l'analyse systémique pour se concentrer sur l'objet technique lui-même et sa promotion, sans trop se soucier de la dynamique de sa pénétration éventuelle ni des

effets pervers qui pourraient y être associés. C'est donc plus sur les chances, les conditions et l'échéance du succès que sur ses conséquences que se concentre l'analyse.

Examinons successivement les enseignements et les limites de ces deux approches.

La prospective des systèmes énergétiques et ses enseignements

Il existe de très nombreux exercices de prospective énergétique mondiale ou nationale qui tentent de mettre en cohérence à des dates données, par exemple 2020 ou 2050, des données très diverses de démographie, de développement des diverses sociétés, et de politiques énergétiques et environnementales, pour en tirer des images des besoins d'énergie à ces mêmes dates et des propositions de mise en place des moyens de les satisfaire, au besoin avec des contraintes d'environnement imposées (par exemple, des émissions données de gaz à effet de serre ou une quantité donnée de déchets nucléaires de haute activité). Ces exercices normatifs n'ont pas de prétention prévisionnelle ; ils ont pour but de mettre en évidence les conséquences de politiques diversifiées, les enjeux, les contraintes et les opportunités principales, qu'elles soient de nature technique, ou de nature économique ou sociale. Malgré leurs limites, la vision d'ensemble systémique qu'ils proposent est riche d'enseignements sur les marges de manœuvre dont nous disposons pour agir à moyen et long termes.

Malgré leur diversité, on peut grossièrement classer ces scénarios en deux catégories. La première d'entre elles rassemble des visions d'un avenir énergétique fondé sur l'abondance d'énergie, considérée comme indispensable au développement des pays encore pauvres mais aussi à la poursuite de la croissance des pays industrialisés. L'hypothèse commune à ces scénarios est celle d'une liaison très rigide entre croissance économique et croissance des besoins d'énergie, avec une élasticité voisine de l'unité, qui permet de construire une image des besoins futurs de chaque société à partir de considérations sur la croissance économique. Ils conduisent à une multiplication des besoins énergétiques mondiaux d'un facteur 2,5 à 3 en 50 ans — 25 à 30 milliards de tep (tonnes équivalent pétrole). La satisfaction de ces besoins repose sur une dynamique de mobilisation massive des différentes ressources énergétiques, et du progrès scientifique et technique. Les scénarios se différencient les uns des autres par la plus ou moins forte priorité qu'ils accordent à telle ou telle ressource, et aux effets négatifs sur l'environnement que sa mobilisation massive peut entraîner (par exemple, les gaz à effet de serre pour le charbon, la prolifération et les déchets à haute activité pour le nucléaire).

La seconde catégorie de scénarios inverse le propos et propose un développement par la sobriété énergétique en accordant une place prépondérante à la maîtrise de l'évolution de la demande d'énergie. À partir d'une analyse détaillée des besoins finaux d'énergie du développement, ils affichent clairement la

volonté de repousser simultanément l'ensemble des risques. Ils se fondent largement sur l'analyse historique du développement des pays industrialisés qui montre que tous les pays ont vu leur intensité énergétique (le rapport de la consommation d'énergie au produit intérieur brut) croître dans un premier temps, puis se stabiliser avant de décroître. Ils impliquent un élargissement de la sphère d'intervention de la politique énergétique traditionnellement centrée sur les problèmes de l'offre d'énergie, à l'ensemble des secteurs d'activité qui structurent la demande d'énergie. À ce titre, ils portent un intérêt particulier aux grandes infrastructures d'urbanisme, de transport, de logement et de réseaux de distribution de fluides (eau, énergie, etc.), qui déterminent pour des durées de temps considérables (souvent supérieures au siècle) la nature et les quantités d'énergie nécessaires au fonctionnement des sociétés qui s'y développent.

Ils conduisent au même horizon 2050 (et pour des croissances économiques des différentes régions du monde analogues à celles des scénarios de la première catégorie), à des consommations mondiales d'énergie de 1,3 à 1,5 fois celle d'aujourd'hui (13 à 15 milliards de tep).

On constate immédiatement que c'est bien plus par le volume d'énergie que par l'appel plus ou moins grand à telle ou telle ressource que se différencient ces scénarios. Même constat pour la France : entre les projections du scénario dit tendanciel de la DGEMP (Direction générale de

l'énergie et des matières premières) et celles du scénario négaWatt (sobre et efficace) ⁵ en 2050, il y a un rapport égal à deux dans les consommations finales d'énergie. Et là aussi la réflexion sur le choix des infrastructures et l'organisation collective prime sur la réflexion sur les modes de production d'énergie.

Cette revue rapide des scénarios énergétiques montre à l'évidence que la marge de manœuvre principale dont nous pouvons disposer, aussi bien au niveau mondial qu'au niveau européen ou français, est la maîtrise de l'énergie. Il s'agit là manifestement d'un choix de premier rang qui relègue au second plan les débats sur la production. Ni les énergies renouvelables, ni le nucléaire, ni la somme des deux, même avec des politiques de développement très ambitieuses, ne suffisent, dans les 50 ans qui viennent, et de loin, à éviter la catastrophe climatique annoncée si nous continuons sur notre lancée actuelle. Sans affecter une priorité absolue à la maîtrise de la demande d'énergie, il n'est pas possible de répondre au défi du développement sans provoquer des dégâts irréversibles et inacceptables à l'environnement, au travers du changement climatique comme des déchets nucléaires.

Futurologie et utopies technologiques : voies de salut énergétique ?

L'enseignement des scénarios précédents, pourtant à première vue incontournable, ne conduit pourtant

5. Voir site Internet de l'association négaWatt, www.negawatt.org.

pas à la révolution culturelle et aux décisions politiques qu'on pourrait attendre. L'hypothèse de l'abondance énergétique, malgré les impasses auxquelles elle conduit *a priori*, reste centrale dans l'imaginaire collectif et dans la boîte à outils des décideurs politiques. Devant la menace, plutôt que se rendre à l'évidence et engager les politiques de modération et d'efficacité indispensables, on préfère continuer comme si de rien n'était et faire le pari que des ruptures technologiques viendront à temps modifier suffisamment la donne pour nous permettre de continuer sur notre lancée. Plutôt que nous imposer un minimum de contraintes (considérées souvent comme *a priori* insupportables) et d'actions collectives sur la demande d'énergie, faisons confiance à la dynamique irrésistible du progrès scientifique et technique.

Et dans ce domaine des ruptures technologiques, on ne manque pas d'imagination ni d'ambition : les chercheurs, les ingénieurs et les industriels fourmillent de projets enthousiasmants présentés chaque fois aux citoyens que nous sommes comme « la » réponse énergétique au double défi d'un développement exponentiel mais égalitaire de l'humanité, et de préservation de la planète : fusion thermonucléaire, hydrogène, captation et stockage souterrain du CO₂, satellites solaires, etc.

Les promoteurs de ces technologies potentielles du futur, que l'on pourrait appeler des « utopies technologiques » dans la mesure où la démonstration de la possibilité technique, économique et sociale de leur emploi à grande échelle reste encore du domaine de la simple conjecture,

leur attribuent des caractéristiques évidemment alléchantes :

— Leur capacité potentielle à résoudre entièrement ou presque et pour des siècles, voire pour l'éternité, les problèmes croissants auxquels l'humanité va se trouver confrontée dans chacun des domaines considérés.

— Leur totale innocuité environnementale, la très faible probabilité d'occurrence et la bénignité des accidents qui pourraient éventuellement survenir.

— Leur très faible coût, dès les étapes indispensables de la démonstration de faisabilité et du développement industriel franchies.

Elles apparaissent donc bien souvent comme un élément majeur de réponse aux questions les plus délicates qui se posent à l'humanité. Tout le monde ou presque semble admettre sans discussion l'ampleur des enjeux qui s'attachent à leur développement. Le débat se cantonne donc aux chances du succès, à son échéance et aux coûts de mise au point.

En revanche, pas de débat sérieux sur l'adéquation de la « solution » proposée au problème qu'elle est censée résoudre, ni sur les causes et les implications du problème en question. Pas non plus, généralement, de questionnement sur la dynamique de mise en place de la technologie en question, des problèmes économiques et sociaux qu'elle risque de provoquer, et de ses effets pervers éventuels sur l'environnement.

C'est sur ces diverses questions que nous allons nous pencher maintenant.

Les utopies technologiques

Auguste Detœuf, dans *Les Propos d'un confiseur* ⁶, disait avec un bon sens qui n'est pas si commun que « ce n'est pas au pied du mur qu'on voit le maçon, c'est en haut ! » Comment gérer le succès éventuel des recherches et développements des technologies en ruptures censées apporter des réponses majeures aux problèmes énergétiques ? Comment apprécier la réalité des enjeux affichés, la dynamique temporelle d'implantation possible des technologies, leurs effets potentiellement pervers, etc. ? Essayons de mieux apprécier pour chacune des technologies étudiées, à partir de quelques exemples, les conséquences physiques, économiques, sociales et environnementales d'un éventuel succès.

La civilisation de l'hydrogène ?

Parmi les ruptures technologiques régulièrement évoquées, l'hydrogène est actuellement bien placé. On sait bien en effet que la croissance très rapide du trafic automobile observée dans les pays riches, et son développement dans les grands pays comme la Chine, l'Inde ou le Brésil, vont créer une situation intenable en termes aussi bien de ressources énergétiques que d'émissions de gaz à effet de serre. L'hydrogène est souvent présenté comme « la » solution.

Les propos introductifs de Jeremy Rifkin dans son livre *L'Économie hydrogène* ⁷ donnent le ton : « L'hydrogène est l'élément le plus léger, le plus simple et le plus répandu de

l'univers. Exploité sous forme d'énergie, il devient un combustible *éternel*. *Inépuisable*, il est aussi non polluant puisqu'il ne contient pas un seul atome de carbone [...] Le réseau énergétique mondial alimenté à l'hydrogène est la prochaine révolution technologique, commerciale et sociale de l'histoire [...] L'exploitation judicieuse de cette ressource permet à terme d'envisager *l'émancipation* de chaque être humain, inaugurant ainsi le premier régime *énergétique véritablement démocratique* de l'histoire humaine. »

Comment ne pas s'enthousiasmer pour cette perspective de sortie de crise énergétique et environnementale ? Le couple hydrogène-pile à combustible serait-il « la » solution ?

Il est bien vrai que la recherche, engagée depuis le début des années 1950, a permis des progrès importants, en particulier sur les piles à combustible qui transforment aujourd'hui l'hydrogène en électricité avec de bons rendements (60 % contre 35 % à 40 % pour les moteurs à essence). Elles sont encore 5 à 10 fois trop chères, mais l'histoire montre bien que « l'apprentissage industriel » doit permettre en 20 ou 30 ans d'atteindre la compétitivité, si on y consacre les efforts nécessaires.

Alors pourquoi bouder notre plaisir ? Tout simplement parce que ne regarder l'hydrogène que du côté de son utilisation revient à occulter la plupart des problèmes. Certes, il y a pléthore d'hydrogène sur notre planète. Mais il se trouve principale-

6. DETŒUF Auguste. *Propos d'O.L. Barenton, confiseur*. Paris : éd. d'Organisation, 2000, 1^{re} éd. 1926.

7. Paris : La Découverte, 2002.

ment dans la nature sous forme d'eau qui nous entoure ou d'hydrocarbures. Il faut donc casser les molécules pour n'en garder que l'hydrogène qui, en brûlant, donnera de nouveau de l'eau. Et cette opération de séparation de l'hydrogène de l'eau ou des hydrocarbures consomme beaucoup d'énergie. Si l'on part de méthane, par exemple, on obtient par réaction dans un « réformeur » de l'hydrogène avec un rendement de l'ordre de 60 % : il faut dépenser 5 kWh de chaleur pour obtenir 1 m³ d'hydrogène, à son tour susceptible de fournir 3 kWh de chaleur ou 1,8 kWh d'électricité dans une pile à combustible.

On peut aussi partir de l'eau et la décomposer par électrolyse. Là encore, il faut aujourd'hui environ 5 kWh d'électricité pour obtenir 1 m³ d'hydrogène. Et la production de l'électricité nécessaire entraîne à son tour des pertes : au total, un rendement de 12 % à 18 % selon que l'on part de nucléaire ou de turbines à gaz pour produire l'électricité. Si l'électricité est renouvelable, pas d'émissions de gaz à effet de serre, mais un problème de rendement global, de dispersion et d'intermittence de certaines de ces sources (solaire, éolien) dont les procédés industriels d'électrolyse s'accommodent mal. On peut aussi imaginer décomposer la molécule d'eau par apport de chaleur. On espère en effet, à 800° Celsius, obtenir un rendement de l'ordre de 50 %. Pour produire cette chaleur à haute température sans combustibles fossiles, les chercheurs nous proposent un réacteur nucléaire à très haute température. Mais les réacteurs en question ne sont encore qu'à l'état de « projet-

papier » et il n'existe pas à ce jour de démonstration d'une production industrielle d'hydrogène à 800° Celsius. Il faudra enfin trouver des solutions de stockage, au niveau des véhicules, de quantités d'hydrogène compatibles avec l'autonomie recherchée.

Bref, les perspectives et le bilan global de l'opération ne sont pas aussi brillants qu'on veut bien nous le dire.

Résumons-nous. Dans le cas des transports automobiles, considérés comme la voie royale par les promoteurs de l'hydrogène, c'est avec les piles à combustible utilisant un carburant embarqué qu'on obtient les meilleurs rendements globaux (30 %). C'est un progrès sensible par rapport aux meilleures technologies diesel actuelles (21 % à 23 % de rendement). Aucune pollution locale, mais une production de gaz carbonique encore importante (de l'ordre de 60 % à 70 % des émissions actuelles du diesel). Avec l'électrolyse, à partir d'électricité nucléaire ou renouvelable, on évite cet inconvénient. Mais avec le nucléaire actuel, le rendement global de l'opération tombe nettement au-dessous de 15 %, ce qui grève d'autant les coûts de production. Restent les réacteurs nucléaires à haute température mais on est encore en pleine incertitude sur la faisabilité même du procédé et, bien entendu, sur ses coûts.

Mais, entend-on bien souvent, si nous n'avons plus d'autre choix, il faudra bien en passer par là, même au prix fort, quand les carburants pétroliers auront aussi atteint des sommets. C'est oublier qu'il existe des solutions alternatives, dont cer-

taines émergent déjà sur le marché, et qui ont des caractéristiques de rendement et d'émission du même ordre de grandeur que la pile à combustible. C'est le cas par exemple des véhicules hybrides, dont les performances énergétiques et d'émissions de gaz à effet de serre sont légèrement supérieures à la solution pile à combustible⁸, sans pour autant entraîner de changement dans le circuit de distribution du carburant automobile.

Stéphane His⁹ a comparé les conséquences énergétiques et environnementales de la pénétration de différentes technologies en rupture par rapport à une amélioration progressive des performances des moteurs, dans des scénarios mondiaux de transport.

En 2060, les consommations d'énergie et les émissions de CO₂ sont multipliées par quatre, alors que le trafic automobile est multiplié par sept et le trafic de marchandises par huit. C'est dire que le progrès technique permet des économies importantes, d'un facteur deux environ, par rapport à une évolution à technologie constante.

En revanche, les différences entre les scénarios « ruptures technologiques » et le scénario « amélioration des technologies traditionnelles » restent encore très modestes, de l'ordre de 10 %, aussi bien en consommation d'énergie qu'en émissions de gaz à effet de serre.

L'auteur ajoute que « les résultats des PAC [piles à combustible] en termes d'émissions pourraient s'améliorer si l'électrolyse était majoritairement réalisée à partir d'électricité nucléaire. Mais la production de 2 à 3 000 Mtep annuelles d'électricité suppose, avec les technologies actuelles, la mise en place dans le monde d'une centrale par semaine d'ici 2060, pour n'alimenter que 40 % de la demande de ce secteur d'activité, ce qui pose bien évidemment des problèmes industriels et environnementaux considérables, sans compter les questions de réserves d'uranium. »

Et puis surtout, quelle que soit la rupture technologique envisagée, si la croissance des trafics se poursuit au rythme indiqué dans le scénario, on reste très loin des objectifs de réduction des consommations d'énergie et de CO₂ qui sont considérés comme indispensables pour éviter la catastrophe climatique.

Alors, faire croire que l'hydrogène et la pile à combustible sont « la » solution à moyen et long termes à nos problèmes énergétiques et environnementaux, est non seulement fallacieux mais dangereux et démobilisateur pour les citoyens consommateurs, trop enclins à continuer comme si de rien n'était à consommer de l'énergie sans compter, en se rassurant à bon compte de propos trompeurs. C'est d'autant plus dommage que cette technologie mérite sûrement d'être développée et utilisée à bon escient.

8. Sauf si l'on cumule les difficultés de l'installation d'un réseau diffus d'hydrogène qui permettrait l'alimentation à la pompe et du développement d'une filière entièrement nouvelle de production d'hydrogène à haut rendement, fondée sur des réacteurs haute température.

9. HIS Stéphane. « Quelles alternatives énergétiques à moyen et long termes ? » *Revue de l'énergie*, février 2004.

Glisser le CO₂ sous le tapis ?

Devant la raréfaction des ressources pétrolières, la tentation est grande de taper dans les stocks de charbon encore importants qui sont disponibles sur notre planète, à condition de régler le problème des émissions de gaz à effet de serre en trouvant le moyen de continuer à brûler ce charbon sans émettre de CO₂. D'où l'idée de la séquestration géologique du CO₂.

C'est géologiquement faisable dès maintenant dans les puits de pétrole épuisés, c'est probablement possible à plus long terme dans une série d'aquifères, si on résout les problèmes de sécurité que cela pose. C'est maîtrisable technologiquement puisqu'on sait séparer chimiquement le CO₂ des fumées des centrales thermiques et que des projets d'injection de ce CO₂ dans des puits pétroliers sont en cours en grandeur réelle, comme en mer du Nord à Sleipner.

Au plan économique, les coûts de capture représentent de 70 % à 90 % des coûts totaux, soit 5 à 40 dollars US par tonne de CO₂ capturé. Ceux de transport sont fonction de la distance, du diamètre des pipelines et donc du volume des émissions. Ils varient de 1 à 3 dollars US par tonne de CO₂ et par 100 km. Lors de simulations sur des configurations réelles, les coûts de stockage varient de 1 à 2 dollars US par tonne de CO₂ injecté dans le sous-sol. Selon l'AIE (Agence

internationale de l'énergie), l'ordre de grandeur du coût global capture + transport + stockage (océan ou sous-sol) est de 40 à 60 dollars US par tonne de CO₂ évitée.

Au total, les coûts de séquestration ne sont pas hors d'atteinte et n'entraîneraient guère plus qu'un doublement des prix des énergies fossiles.

Somme toute, aurions-nous enfin la solution ? Une récente étude du Club d'ingénierie prospective (CLIP)¹⁰, montre que l'industrialisation massive de cette technologie à partir de 2020 permettrait *théoriquement*¹¹ d'éviter au maximum 45 % des émissions cumulées de la production électrique entre 2000 et 2050 (460 Gt de carbone), à condition d'atteindre l'objectif de division par deux des consommations énergétiques du procédé de capture en post-combustion (adapté aux centrales existantes), et celui de l'installation systématique à partir de 2020 de centrales à oxy-combustion pour le renouvellement et l'extension du parc.

Mais si l'on tient compte de la géographie, le bilan est nettement moins favorable. En effet, les régions bien dotées pour le stockage en gisements d'hydrocarbures ne représentent qu'une faible part du potentiel mondial de capture. La Russie ou le Moyen-Orient représentent à eux seuls 60 % des capacités de stockage alors que la capture de leurs émissions n'en représente que 10 %. Et

10. PLOUCHART Georgia et FRADET Aude. « Évaluation du potentiel de capture et de stockage géologique du CO₂ dans le monde ». *Cahiers du CLIP*, n° 17, septembre 2005.

11. À ce propos, dans un article des *Échos* du 15 septembre 2005, la présidente de l'ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) cite ces chiffres mais oublie de signaler que de la théorie à la pratique, on risque fort de devoir diminuer d'un facteur trois à quatre.

la prise en compte d'un seuil de 1 000 km entre source et site de stockage réduit de façon sensible le potentiel de la filière ; c'est ainsi que les pays couvrant 80 % du potentiel de capture ne pourraient éviter plus de 16 % de leurs émissions cumulées d'origine électrique de 2000 à 2050, de l'ordre de 6 % à 7 % de leurs émissions totales de CO₂ dues à l'énergie.

C'est bien, mais encore une fois, comme dans le cas de l'hydrogène, c'est très peu vis-à-vis de l'urgence et de l'importance des réductions des émissions mondiales indispensables.

À travers ces deux premiers exemples, on voit bien que les solutions proposées, contrairement à ce que nous racontent leurs zéloteurs, même si elles rencontrent le succès annoncé, n'apportent que des réponses trop tardives et très partielles au problème qui nous occupe. Même si elles représentent à terme une activité industrielle importante et méritent d'être développées, en aucun cas on ne peut se reposer sur elles pour résoudre la question énergétique sans revoir fondamentalement notre attitude devant la demande d'énergie.

On pourrait multiplier les exemples de ce type :

— La génération IV des réacteurs nucléaires dont l'apparition vers 2040 ou 2045 est présentée comme « la solution » à la question des déchets de haute activité et à très longue

durée de vie, et dont on s'aperçoit très vite qu'elle ne commence à se révéler efficace en termes de réduction des déchets, si elle émerge industriellement (ce qui n'est pour le moins pas sûr), qu'une centaine d'années plus tard, vers 2140¹² et impose donc une pérennisation du nucléaire sur plus d'un siècle.

— La fusion thermonucléaire contrôlée, dont personne n'imagine sérieusement qu'elle pourrait arriver à maturité industrielle avant 2060 ou 2080 et qui, indépendamment des nombreux problèmes qu'elle risque de poser¹³, est présentée par ses promoteurs comme une solution qui devrait rendre totalement obsolète la fission nucléaire (et la génération 4 de réacteurs !) avant la fin du siècle, laissant ainsi entier le problème des déchets d'un siècle de fission...

— Le photovoltaïque, dans son application massive aux pays pauvres non encore électrifiés, présenté bien souvent comme « la » solution d'électrification décentralisée des deux milliards de personnes qui n'ont pas accès aux services de l'électricité. Quand on sait qu'en multipliant le rythme actuel (50 000 par an) par 100, il faudrait 600 ans pour y parvenir, on peut se poser quelques questions. Pour changer complètement de rythme, il faudrait en effet que cette activité fasse l'objet d'un réel marché (non totalement subventionné comme actuellement). Mais il faudrait pour cela que les systèmes photovoltaïques actuelle-

12. Voir en particulier l'« analyse contradictoire » du dossier du débat de la Commission particulière du débat public « Gestion des déchets radioactifs ». Site Internet <http://forum.debatpublic-dechets-radioactifs.org>.

13. TREINER Jacques. « Com' ou information scientifique ? Le cas d'ITER ». *Cahiers de Global Chance*, n° 20, février 2005.

ment cinq à sept fois plus onéreux que leurs concurrents (le petit diesel, par exemple) atteignent la compétitivité, ce qui reste très improbable puisque leur coût actuel est à 80 % constitué de composants (batterie électronique, etc.) dont le coût ne se réduit plus, au contraire des photopiles¹⁴. Si le photovoltaïque doit trouver une application massive à moyen terme, c'est très probablement dans les pays riches possédant un réseau maillé qui permet d'éviter une bonne part de coûts de système et de profiter ainsi à plein des baisses de coûts constantes des photopiles qu'engendrera leur fabrication en grandes séries.

On navigue donc en pleine utopie ou peut-être même en plein mensonge. Croire ou faire croire que la génération photovoltaïque arrive à temps pour sauver les peuples de la pauvreté et du sous-développement n'est pas honnête. Il est déjà possible d'apporter l'énergie nécessaire, autrement et tout de suite, et pour moins cher : c'est une question de volonté politique, de coopération à la mise en œuvre. Le photovoltaïque reste simplement en compétition, au cas par cas.

Le constat est clair : chacune des technologies proposées peut certes contribuer à plus ou moins long terme à la solution des problèmes énergétiques mondiaux. Mais leur contribution cumulée éventuelle (si tout marche au mieux) au cours du

XXI^e siècle ne saurait dépasser 5 % à 10 % au mieux. Ce n'est pas rien, mais c'est manifestement du second ordre par rapport aux efforts de maîtrise de l'énergie dont les effets cumulés au cours de ce siècle pourraient atteindre 35 % à 40 %¹⁵.

Mais alors que faire ?

La prospective énergétique a l'immense mérite de nous montrer que le pire, l'emballement du changement climatique, aujourd'hui probable, n'est pourtant pas, et de loin, inéluctable. Il existe encore une voie de sortie : elle ne repose pas d'abord sur la mise en place de nouveaux outils ou vecteurs de production d'énergie moins dangereux pour la planète. Elle n'impose pas la foi du charbonnier que nous propose la futurologie technologique et ses mirages à long terme. Elle s'appuie bien plus modestement sur notre capacité collective à contrôler notre consommation d'énergie. C'est au prix d'un double effort de sobriété et d'efficacité que l'on pourra « réouvrir » la porte qui se ferme inéluctablement.

Mais cette consommation d'énergie est très largement déterminée par nos infrastructures et nos modes de vie (urbanisme, habitat, transports, qui sont les déterminants principaux de notre consommation d'énergie¹⁶), nos comportements collectifs et nos comportements individuels. Cela veut clairement dire

14. DEVIN Bernard et BLAUSTEIN Edgar. « Les limites de l'utopie photovoltaïque décentralisée pour les pays en développement ». *Cahiers de Global Chance*, n° 20, février 2005.

15. DESSUS Benjamin. *Énergie 2010-2020. Les défis du long terme*. Paris : Commissariat général du Plan, octobre 1997.

16. Les secteurs habitat, tertiaire et transports dans un pays comme la France représentent 75 % de la consommation d'énergie.

que ce ne sont plus les producteurs d'énergie, ni les scientifiques des sciences dures et les ingénieurs, mais bien les citoyens qui sont en première ligne. Pas seulement comme on nous le fait croire souvent sur le mode culpabilisant, en tant que consommateurs, mais aussi et peut-être surtout en tant qu'acteurs collectifs : de notre action citoyenne dépendent les choix d'infrastructure et nos modes d'organisation locaux, territoriaux, nationaux. Ne renvoyons pas toujours, par paresse ou par ignorance, la responsabilité des affaires de l'énergie aux nébuleuses insondables des multinationales tentaculaires de l'énergie, ni aux seuls arbitrages du ministère français de l'Industrie, ni les échéances aux calendes grecques des utopies technologiques.

Prenons les affaires en main dans nos quartiers, nos villes, nos régions. L'énergie et la survie de la planète, c'est d'abord l'affaire des citoyens. Il faut inventer une politique reposant sur la prévention et non sur la course à la production ; sur l'intelligence collective, et non plus sur les certitudes d'experts et les compromis des *lobbies* producteurs ; sur l'initiative locale plutôt que sur la centralisation. Les citoyens sont au centre d'un tel processus novateur : sans leur vigilance, sans leur apport, sans leur pression sur les pouvoirs publics locaux et nationaux, sur les entreprises, rien ne sera possible. La porte est encore ouverte : à nous d'y mettre le pied avant qu'elle ne claque sous l'effet de la tempête.

AVIS À TOUS NOS LECTEURS / DÉMÉNAGEMENT

Le groupe Futuribles a déménagé le 15 décembre 2005. Ses coordonnées téléphoniques et électroniques demeurent inchangées, mais sa nouvelle adresse postale est la suivante :

Futuribles
47 rue de Babylone
75007 Paris

n°58

TROISIÈME TRIMESTRE 2005

Les Cahiers de la sécurité

REVUE TRIMESTRIELLE DE SCIENCES SOCIALES

Vient de paraître



INSTITUT NATIONAL
DES HAUTES ÉTUDES
DE SÉCURITÉ

www.inhes.interieur.gouv.fr

n°58



3^e trimestre 2005

n°57



2^e trimestre 2005

18 € le numéro

En vente à :
La Documentation française
124, rue Henri-Barbusse,
93308 Aubervilliers cedex
Tél : 01 40 15 70 00
Fax : 01 40 15 68 00
ladocumentationfrancaise.gouv.fr

Polices et «policing» de la route

Un nouveau regard sur la sécurité

Si la sécurité routière fait l'actualité, les régulations policières des déviances routières sont peu interrogées. Des recherches récentes entreprennent de combler le déficit de connaissances sur les polices de la route et leurs activités. Portant sur différents pays, elles montrent la diversité des formes prises et des missions remplies par ces agences.

Incivilités dans les espaces publics et commerciaux

*Un dialogue entre chercheurs
et gestionnaires*

Gare, bureau de poste, parc, grand magasin ou galerie marchande : un espace ouvert au public n'est pas seulement le lieu de possibles incivilités. Il est aussi un réservoir de civilité : la façon dont ses usagers – clients, employés, gestionnaires – l'occupent contribue à sa « qualité », donc à sa sécurité. C'est ce qu'enseigne un dialogue inédit entre chercheurs et responsables d'espaces, commerciaux ou non, accueillant un large public.

publicité

Véronique Lamblin ¹

Quelles pistes de recherche pour maîtriser l'effet de serre ?

Ainsi qu'on peut le lire dans la plupart des articles de ce numéro spécial, tous les scénarios de stabilisation ou réduction des émissions de gaz à effet de serre dans des limites « acceptables » requièrent une action véritable en matière de maîtrise de la consommation énergétique. Comme le souligne ici Véronique Lamblin, tous les progrès possibles du côté de l'offre d'énergie (notamment en termes de rendement ou de baisse de coût des technologies de production) seront bons à prendre ; néanmoins, cela ne sera probablement jamais suffisant compte tenu des enjeux climatiques auxquels nous sommes confrontés.

Aussi, après avoir montré l'importance cruciale de la maîtrise énergétique, elle présente ici les diverses pistes d'action possible pour réduire la consommation énergétique des pays développés : technologies de production à moindre contenu en carbone, maîtrise de la demande d'électricité et d'énergie-transport, objets intelligents capables de détecter et réduire les pertes d'énergie, gestion des flux énergétiques dans l'habitat, l'industrie et l'automobile, substitution produits / services, etc. Malheureusement, en dépit des multiples possibilités existantes ou à venir, la maîtrise de l'énergie demeure un sujet tabou (notamment parce qu'elle est trop souvent assimilée, à tort, à un frein à la croissance) et ne fait pas l'objet d'investissements à la hauteur des enjeux (en termes de recherche technologique ou socio-organisationnelle, par exemple).

C'est là une lacune majeure de la part des pouvoirs publics et des industriels, en France, en Europe, comme partout dans le monde. Il est

1. Directrice des études du groupe Futuribles.

évident que sans action volontariste rapide dans cette direction, stabiliser les émissions pour limiter le réchauffement climatique à un niveau « raisonnable » restera un vœu pieux.

S.D.

Les enjeux climatiques

Le changement climatique fait régulièrement la une de la presse, que ce soit lors de chaleurs estivales ou quand nous observons une plus grande fréquence des événements climatiques extrêmes. Certes, l'accord de Kyoto, signé en 1997, a été ratifié en février 2005, mais les engagements sont bien minces ² au regard des enjeux limités dans le temps, et le pays le plus émetteur de la planète, les États-Unis, ne l'a pas ratifié.

Stabiliser la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère et donc le réchauffement climatique, requiert de limiter à un moment donné les émissions mondiales à 3 ou 3,5 milliards de tonnes de carbone par an, soit ce que la biosphère (essentiellement les océans) est capable d'absorber annuellement (contre environ sept milliards de tonnes aujourd'hui).

L'atteinte de cet objectif à un horizon de 50 ans permettrait de ne pas dépasser une concentration de 450 ppm (parties par million) par

mètre cube de dioxyde de carbone ³ dans l'atmosphère à la fin du siècle (ou 550 ppm d'équivalent CO₂ par mètre cube si l'on intègre les six gaz à effet de serre couverts par le protocole de Kyoto, en particulier le méthane et les oxydes d'azote essentiellement liés à l'agriculture ⁴). On espère qu'à cette concentration, le réchauffement climatique n'excèdera pas 2°C à la fin du siècle prochain. Un scénario de « laisser-faire » conduirait à une augmentation de 4 à 6°C de la température moyenne du globe à l'horizon 2100, soit l'équivalent du passage d'une période glaciaire à une interglaciaire en 100 ans au lieu de 10 000 ans !

La consommation d'énergie carbonée est la principale source d'émissions de gaz à effet de serre anthropique, en particulier le dioxyde de carbone à plus de 90 %. Aussi, stabiliser la concentration de dioxyde de carbone conduit à un recours aux énergies fossiles ne dépassant pas quatre Gtep (milliards de tonnes équivalent pétrole) hors séquestration du carbone (avec la répartition actuelle de consommation des éner-

2. L'objectif du protocole de Kyoto est une réduction moyenne de 5 % des émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2008-2012 dans les pays développés.

3. La concentration actuelle est de 370 ppm, elle était de 290 ppm au XIII^e siècle.

4. Les six gaz à effet de serre concernés sont : le dioxyde de carbone (CO₂), les hydrofluorocarbones (HFC), les hydrocarbures perfluorés (PFC), l'hexafluorure de soufre (SF₆), le méthane (CH₄) et l'oxyde nitreux (N₂O). Les deux derniers sont particulièrement liés à l'agriculture qui, en Europe, est responsable d'environ 10 % des émissions de gaz à effet de serre, le reste des émissions étant essentiellement lié à la consommation énergétique de combustibles fossiles, à laquelle sont ajoutées les émissions de *process* dues aux réactions chimiques dans l'industrie.

gies fossiles, une tep correspond à environ 0,9 tonne de carbone). Or, la consommation mondiale actuelle est de neuf Gtep dont huit Gtep de combustibles fossiles, soit le double de ce qu'il serait nécessaire de consommer à l'horizon 2050. D'où l'objectif de diviser par deux les émissions mondiales de gaz à effet de serre d'ici à 2050 (en fait, diviser par quatre celles des pays développés plus riches et plus émetteurs, pour autoriser les pays les plus pauvres à se développer et parvenir *in fine* à une division par deux à l'échelle de la planète).

Par ailleurs, toutes les études montrent que pour parvenir à une concentration stabilisée des émissions de gaz à effet de serre à un niveau « raisonnable » (450 ou 550 ppmv de CO₂ suivant les auteurs), il est nécessaire de commencer à réduire les émissions dès 2020-2030.

Les prévisions énergétiques et l'enjeu de la maîtrise de l'énergie

De nombreux scénarios prévisionnels de la consommation énergétique mondiale ont été réalisés par des organismes spécialisés comme l'Agence internationale de l'énergie (AIE), le Conseil mondial de l'énergie (CME), des entreprises (Shell), le CNRS (Centre national de la recherche scientifique, France) ou des experts.

Il existe deux types de scénarios sur l'énergie. Les uns raisonnent en fonction du taux de croissance des consommations énergétiques primaires (lié dans les modèles de calcul à la croissance prévisionnelle de l'économie et de la démographie) et envisagent des substitutions énergétiques tout en prenant en compte les progrès d'intensité énergétique ; le développement énergétique des pays les moins développés tend à reproduire le modèle que nous avons connu.

Les autres cherchent à prendre en compte des politiques plus volontaristes de maîtrise de la demande et un développement énergétique des pays émergents utilisant de nouvelles technologies ou qui « saute » des étapes technologiques (comme dans le domaine de la téléphonie).

Ceci explique la dispersion observée entre les différents scénarios de consommation mondiale d'énergie à l'horizon 2050 (tableau page suivante) : de 11 Gtep (scénario Noé du CNRS)⁵ ou 14 Gtep (scénarios C du CME), légèrement inférieure à 20 Gtep (scénario Shell « Dynamics as Usual » en 2001, celui de Pierre-René Bauquis⁶ en 1999, ou le scénario B du CME en 1998), à 24-25 Gtep (scénarios A du CME en 1998, scénario Shell « Spirit of the Coming Age » en 2001, scénarios AIE de 2003).

Les prévisions tendanciennes de l'AIE à l'horizon 2050 accordent une

5. DESSUS Benjamin. *Énergie, un défi planétaire*. Paris : Belin (Débats), 1999.

6. BAUQUIS Pierre-René. « Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050 ». *Revue de l'énergie*, n° 509, septembre 1999, pp. 503-510. Pierre-René Bauquis est professeur associé de l'Institut français du pétrole, et ancien directeur de la stratégie et conseiller du président du groupe Total.

Consommation mondiale d'énergie (en Gtep) : comparaison des principaux scénarios récents à divers horizons								
Organisme et publication (date)		Consommation totale d'énergie primaire						
		2000	2010	2015	2020	2025	2030	2050
WETO (2003)		10,2	12,4	–	15,4	–	17,3	–
DOE IEO (2005)	Scénario de référence	10,2	12,7	14	15,1	16,3	–	–
	Scénario / forte croissance	10,2	13,2	14,7	16,2	17,9	–	–
	Scénario / croissance faible	10,2	12,3	13,2	14	14,8	–	–
AIE WEO 2005	Scénario de référence	10,7	12,3	–	14,4	–	16,2	–
	Scénario de politique alternative	10,7	–	–	13,5	–	14,6	–
AIE (2003)	Scénario « Vision »	9,9	11,2	–	14,4	–	18	24,1
CME ETWAN (1998)	A1	10,7	12,8	–	15,4	–	18,4	24,8
	A2	10,7	12,8	–	15,4	–	18,4	24,8
	A3	10,6	12,8	–	15,3	–	18,4	24,6
	B	10,1	11,7	–	13,5	–	15,5	19,8
	C1	9,7	10,5	–	11,4	–	12,3	14,2
	C2	9,7	10,5	–	11,4	–	12,3	14,2
Shell (2001)	DAU	9,5	–	–	–	14,5	–	19
	SCA	9,5	–	–	–	17	–	25
P.-R. Bauquis (1999)		9,3	12	–	14	–	–	18

Sources / légende :

- WETO (*World Energy, Technology and Climate Policy Outlook 2030*). Bruxelles : Commission européenne, 2003 (direction générale Recherche, avec Enerdata (*World Energy Statistics and Information*), IEPE (Institute of Energy Policy and Economics), BFP (Bureau fédéral du Plan belge) et IPTS (Institute for Prospective Technological Studies). À un horizon 2030, le scénario retenu est de type « Business as Usual » (hors Kyoto ou autres et sans rupture technologique majeure).
- DOE (U.S. Department of Energy), IEO (*International Energy Outlook*) 2005. Le département américain de l'Énergie (Washington, D.C.) possède depuis 1977 une agence statistique chargée des études et recherches concernant l'énergie, l'Energy Information Agency, qui publie tous les ans le rapport IEO.
- AIE (Agence internationale de l'énergie), WEO (*World Energy Outlook*) 2005 et *Energy to 2050. Scenarios for a Sustainable Future*. Paris : AIE, respectivement 2005 et 2003.
- CME (Conseil mondial de l'énergie), ETWAN (*Energy for Tomorrow's World. Acting Now!*). Le CME est une organisation non gouvernementale de droit privé britannique basée à Londres et ayant des membres dans 80 pays. Il a publié en 1998 des scénarios très complets, avec l'appui technique de l'IIASA (International Institute for Applied Systems Analysis) autrichien. Ces six scénarios, bien qu'un peu anciens, sont souvent repris dans d'autres études : scénario A1, forte croissance de la consommation, pétrole et gaz dominants ; scénario A2, forte croissance de la consommation, retour en force du charbon, avec de nouvelles technologies ; scénario A3, forte croissance de la consommation avec un boom du gaz et, dans une moindre mesure, des énergies renouvelables et du nucléaire ; scénario B, scénario tendanciel ; scénario C1, scénario écologique, avec une augmentation de l'efficacité énergétique, de nouvelles énergies renouvelables et disparition du nucléaire à l'horizon 2100 ; scénario C2, scénario écologique, mais avec un nucléaire conquérant fondé sur de nouvelles technologies.
- Shell 2001 : scénario « Dynamics as Usual » (DAU) et scénario « Spirit of the Coming Age » (SCA).
- Pierre-René Bauquis 1999 : « Un point de vue sur les besoins et les approvisionnements en énergie à l'horizon 2050 ». *Revue de l'énergie*, n° 509, septembre 1999, pp. 503-510.

part d'au moins 15 Gtep aux énergies fossiles sur environ 25 Gtep. Dans un scénario de maîtrise de la demande où le besoin s'élèverait à 14 ou 18 Gtep en 2050, l'enjeu serait donc de produire 11 à 14 Gtep d'énergie hors carbone, c'est-à-dire d'origine nucléaire ou renouvelable (1,3 Gtep aujourd'hui), ou encore fossile mais dont l'intégralité du carbone émis est séquestrée ⁷.

L'écart de consommation entre les scénarios, de 11 ou 15 à 25 Gtep, qui dépasse la consommation actuelle, montre bien toute l'importance de l'efficacité énergétique, que ce soit pour limiter le changement climatique ou pour faire face à des contraintes sur les ressources en hydrocarbures.

Les technologies de production énergétique à moindre contenu en carbone

Face au défi de réduire les émissions dans un contexte d'augmentation de la demande à un horizon de 20 ans, le premier réflexe est de rechercher des modes de production d'énergie plus pauvres en carbone. De nombreuses études et « *roadmaps* technologiques » sont disponibles sur ce sujet, mais toutes montrent qu'aucune technologie de production ne peut répondre seule à l'enjeu, dans le temps imparti.

Le nucléaire est certes la voie la plus pragmatique de production

énergétique sans émission de carbone, en coûts et quantité d'électricité fournie, pour les pays où sa sécurité de fonctionnement et la gestion des déchets sont bien contrôlées. Mais le nucléaire ne peut être, aujourd'hui, qu'une source parmi d'autres d'approvisionnement énergétique :

— Dans le monde ⁸, les centrales nucléaires tendent à fournir les besoins électriques de base. Les variations brutales de demande électrique obligent à disposer, en complément du parc nucléaire, de centrales électriques alimentées par des combustibles fossiles pour la production des « pointes » de demande.

— Des solutions aux problèmes spécifiques de l'énergie nucléaire qui limitent son utilisation (élimination des déchets dangereux, risque de prolifération...) ne sont pas envisagées avant la génération IV, qui pourrait voir le jour, au mieux, à l'horizon 2040 ⁹. Cet horizon est trop tardif par rapport à l'enjeu du changement climatique et à la baisse des émissions dès 2020, dans un contexte de demande énergétique croissante.

— Les transports (qui utilisent près d'un tiers de la consommation énergétique finale en France) ne pourront évoluer massivement vers une technologie électrique qu'avec des progrès en rupture dans la capacité de stockage de l'électricité embarquée (et de temps de recharge).

— Enfin, dans les pays en développement dont les besoins d'accès à

7. Captage et stockage du carbone dans des puits de carbone (puits d'hydrocarbures vides, aquifères salins très profonds, ou via des processus physiques et biologiques telle la photosynthèse).

8. OPECST (Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques). *La Durée de vie des centrales nucléaires et les nouveaux types de réacteurs*. Paris : OPECST, mai 2003.

9. Voir, en p. 79 de ce numéro, l'article de Frank Carré et Jean-Claude Petit.

l'énergie sont considérables, le nucléaire se développe — notamment en Chine et en Inde — mais n'est pas adapté aux zones à faible densité de population, *a fortiori* ne disposant pas déjà d'un réseau électrique. L'ambitieux programme de développement du nucléaire civil en Chine ¹⁰ ne devrait couvrir que 5 % de la demande énergétique chinoise à l'horizon 2020.

Les autres modes de production énergétiques à faible émission de carbone sont certes variés : la biomasse, dont les biocarburants ¹¹, la géothermie, les énergies solaire, éolienne et hydraulique. Cependant, le potentiel de la plupart des énergies renouvelables est limité d'ici à 2020, en raison du montant des investissements nécessaires, de la variation du potentiel exploitable selon les régions et des insuffisances des technologies de stockage de l'électricité pour les énergies intermittentes. Sans compter que le temps d'étude et de construction de grands projets comme des barrages hydrauliques est de près de 20 ans.

Enfin, l'idée de capturer et séquestrer le carbone permettrait d'utiliser davantage de combustibles fossiles et en particulier le charbon dont les émissions, pour produire un kWh, sont presque du double de celles du

gaz naturel. Mais la capture du CO₂ n'est envisageable que pour les productions énergétiques centralisées (centrales thermiques et industries lourdes) qui représentent près de 40 % des émissions de CO₂ mondiales. Par ailleurs, outre que la capture diminue le rendement des centrales, le problème est que les lieux de stockage potentiels ¹² du CO₂ (puits de gaz et de pétrole épuisés principalement) ne sont pas toujours localisés à proximité des lieux d'émission. Aussi, le potentiel de séquestration du carbone dépend de la capacité à le séquestrer dans des aquifères salins de grande profondeur, mais ce n'est là encore qu'une piste de recherche.

Les scénarios qui envisagent de se passer de l'énergie nucléaire tout en diminuant les émissions de CO₂, que ce soit le scénario Noé à l'échelle mondiale ou les simulations de pays européens ¹³ (Allemagne, Suisse, Pays-Bas...) sur des systèmes socio-économiques sobres en carbone, avec des objectifs de réduction des émissions de CO₂ de - 60 % à - 80 % de 1990 à 2050, font tous appel à une plus grande maîtrise de la consommation énergétique que les autres, en complément d'une utilisation plus intensive d'énergies renouvelables et du progrès technologique de la production énergétique classique.

10. PERELMAN Rémi. « L'énergie, talon d'Achille de la croissance chinoise ». *Futuribles*, n° 296, avril 2004, pp. 33-41.

11. On peut considérer que la plante absorbe le CO₂ de l'atmosphère pendant sa croissance, CO₂ ensuite ré-émis lors de la combustion énergétique (voir CHOPPLET Marc, THOMAS Daniel. « Vers des alternatives végétales. L'émergence d'une nouvelle bioéconomie ». *Futuribles*, n° 295, mars 2004, pp. 5-18). Néanmoins, dans les émissions « cachées » doivent être comptabilisés les engrais, le carburant des tracteurs...

12. *Les Cahiers du CLIP (Club d'ingénierie prospective énergie-environnement)*, n° 17, septembre 2005.

13. *Que serait une société sobre en carbone ? Aperçus des programmes et réalisations à l'étranger*. Paris : Programme national de lutte contre le changement climatique, 2^e bilan et voies d'avenir, novembre 2002.

Certes, tous les progrès de rendement, de baisse de coût des technologies de production d'énergie seront utiles mais, *a priori* aucune technologie de production ni de séquestration du CO₂ n'est, pour sûr, à la hauteur, seule, des enjeux de l'effet de serre ¹⁴.

La maîtrise de la demande : l'électricité et le transport

Bien que dans un pays comme la France, le besoin de chaleur, principalement pour le chauffage des locaux et l'eau chaude, reste le premier besoin énergétique, la demande électrique et de transport est le moteur de la croissance de la demande d'énergie, en France comme ailleurs dans le monde. Selon l'AIE ¹⁵, la croissance annuelle de leur demande respective devrait atteindre 2,4 % et 2,1 % par an de 2000 à 2030.

Or, force est de constater que si les rendements énergétiques actuels et des prochaines générations de centrales thermiques, de centrales nucléaires, des éoliennes ou de cellules photovoltaïques sont disponibles dans la littérature énergétique, il est en revanche beaucoup plus difficile de trouver ce que consommeront à l'avenir tous les appareils électriques et même les automobiles.

Concernant l'automobile, les études sur le rendement à venir et possible des groupes motopropulseurs (qu'ils soient thermiques, hy-

brides ou électriques, avec ou sans pile à combustible) sont disponibles. Pourtant, chacun sait que les progrès de consommation sur les motorisations, ces 20 dernières années, ont été obérés en grande partie par l'accroissement de la masse des automobiles pour la sécurité et l'acoustique, et par l'ajout de prestations de confort qui, pour la plupart d'entre elles, consomment de l'énergie (assistances diverses, climatisation). Or, si l'on peut espérer que l'alourdissement des voitures pour qu'elles résistent à des chocs de plus en plus violents ait atteint son asymptote — il semble difficile que le corps humain résiste à l'onde de choc au-delà de 70 km/h, or l'habitacle de nos véhicules les plus sûrs résiste déjà, aujourd'hui, à des chocs de 65 km/h —, nombre d'innovations sont encore possibles pour améliorer la sécurité active (éviter ou prévenir l'accident par le contrôle de trajectoire, l'assistance au freinage...) et le confort de conduite. Ces innovations passeront par l'accroissement de l'électronique et d'automatismes, donc de demande électrique. De même, l'électrification des fonctions traditionnellement mécaniques ou hydrauliques semble une tendance lourde ¹⁶, ce qui est en soi aussi un facteur de meilleure gestion de l'énergie. La part d'énergie consommée sous forme électrique à bord d'une voiture peut déjà excéder 30 %, cette part ne fera donc qu'augmenter, même en conservant les motorisations thermiques. La consumma-

14. Voir les scénarios « Facteur 4 », présentés dans l'article de Patrick Criqui, en page 65 de ce numéro.

15. *World Energy Outlook*. Paris : AIE, 2002.

16. Voir BONNAURE Pierre et LAMBLIN Véronique. « L'automobile de demain. Quels enjeux, quelles perspectives ? » *Futuribles*, n° 311, septembre 2005, pp. 25-38.

tion des véhicules ne dépendra donc pas seulement de la performance du moteur et de l'allègement, mais aussi de la consommation et de la performance de la multitude de convertisseurs électriques dont les voitures sont de plus en plus équipées.

Les usages captifs de l'électricité ou ses usages spécifiques (électroménager, éclairage, audiovisuel, froid...) représentent 14 % de la consommation énergétique finale du secteur résidentiel en 2000 et 34 % de celle du secteur résidentiel tertiaire en France (le chauffage des locaux est la principale source de consommation). Cependant, ces usages tirent la consommation à la hausse, dans le résidentiel comme dans le secteur tertiaire, depuis 20 ans.

Dans l'industrie aussi, la mécanisation, l'automatisation et l'informatisation ont contribué à la croissance de la demande électrique (l'électricité représente environ 30 % de la consommation finale d'énergie du secteur industriel en 2001).

Certes, les gros générateurs électriques sont optimisés, avec un rendement énergétique supérieur à 90 % dont on ne peut attendre de progrès. Mais on ne peut en dire autant des performances des petits moteurs électriques, à vitesse variable, des alternateurs automobiles et autres convertisseurs électriques qui accompagnent notre quotidien.

Les technologies de base qu'utilisent les consommations spécifiques

d'électricité (moteurs et actionneurs, pompes et ventilateurs souvent associés à ces moteurs électriques, éclairage / écrans, électronique...) sont de plus en plus utilisés pour tous les usages de l'énergie : l'équipement de l'industrie, du tertiaire, de l'habitat et des automobiles. Mais les informations détaillées sur la consommation actuelle et future de ces « briques » de base se trouvent rarement dans un rapport traitant de l'énergie.

Pourtant, la vitesse de renouvellement des ampoules d'éclairage, des téléviseurs et des lecteurs associés, des ordinateurs et de leurs périphériques, de l'électroménager, des téléphones portables est plus rapide¹⁷ que celle des moyens de production électrique classiques (25 à 35 ans pour les centrales thermiques et davantage pour le nucléaire). En conséquence, tout progrès sur ces technologies sera plus efficace à court et moyen termes, voire plus économique, que les progrès sur les technologies de production.

En ce qui concerne la consommation thermique des bâtiments, les « briques de base » techniques, nécessaires à des résultats rapides, ne peuvent être obtenues qu'en perfectionnant les technologies d'isolation et de rénovation de l'habitat ancien. Les matériaux nanostructurés en très faible épaisseur ou les matériaux à changement de phase (cires)¹⁸, qui stockent la chaleur durant la journée pour la restituer la nuit, les vitrages performants ou

17. Par exemple, une dizaine d'années pour les réfrigérateurs, environ sept ans pour les téléviseurs et probablement moins pour le matériel informatique.

18. Matériau prochainement commercialisé par DuPont de Nemours à 45 euros le mètre carré (source : *Les Échos* du 2 novembre 2005).

actifs (capteurs) constituent des pistes.

La maîtrise, un sujet tabou

La maîtrise de l'énergie est souvent évoquée comme une nécessité, mais elle reste souvent associée, au mieux, à un nécessaire frein à la croissance et au pire à un retour « à la bougie ». Ceci est paradoxal si l'on considère que l'industrie manufacturière française ou européenne qui fabrique des modes de transport motorisés, l'électroménager, l'électronique et les écrans, les appareils de chauffage ou de climatisation, des matériaux pour le bâtiment..., aurait un avantage stratégique dans la compétition commerciale si ses produits avaient une meilleure performance énergétique que ceux de ses concurrents.

Par ailleurs, les programmes de maîtrise de l'énergie lancés dans les années 1970 pour faire face aux chocs pétroliers ont permis, par l'instauration de réglementations thermiques, de diminuer de 60 %¹⁹ la consommation moyenne d'un logement neuf, à confort équivalent, en France. On est loin du retour à la bougie.

Si la lecture des rapports français ou européens indique qu'il y a une réelle conscience politique de l'importance de la maîtrise de l'énergie, en revanche le niveau de priorité dans les budgets de recherche²⁰ est particulièrement faible. À titre

d'exemple, en 2002, les organismes de recherche français ont consacré 940 millions d'euros à la recherche sur l'énergie dont 580 millions d'euros pour le nucléaire, 230 millions pour les énergies fossiles, 50 millions pour les énergies renouvelables, 40 millions pour l'hydrogène et la pile à combustible, et 40 millions pour l'efficacité énergétique.

De fait, ce sont essentiellement des initiatives privées telles que celles d'associations comme Global Chance ou Négawatt, en France, qui nous renseignent davantage sur le potentiel de l'efficacité énergétique dans différents domaines. Avec la difficulté que ces associations militent aussi contre l'usage de l'énergie nucléaire, ce qui, pour certains lecteurs, trouble ou même discrédite le discours. L'association Négawatt²¹ estime ainsi qu'il est possible de réduire d'au moins un facteur deux nos consommations d'énergie et de matières premières, à l'aide de techniques déjà largement éprouvées.

C'est essentiellement par la labellisation de la consommation des appareils que la réglementation européenne tente d'améliorer l'efficacité énergétique. Sur les réfrigérateurs, par exemple, l'étiquetage obligatoire de la consommation électrique depuis 1995 (étiquettes mentionnant la catégorie de consommation de A à G, les catégories A et B étant les plus économes) a certainement contribué à ce que la part de marché

19. RADANNE Pierre. *La Division par quatre des émissions de dioxyde de carbone en France d'ici 2050*. Paris : ministère de l'Écologie et du Développement durable, 2004.

20. *Key Technologies for Europe: Energy*. Rapport téléchargeable sur le site Internet www.cordis.lu/foresight//conference_2005.htm.

21. Association de scientifiques impliquée dans la sobriété énergétique, site Internet www.negawatt.org.

européenne des produits les plus économes, soit ceux appartenant aux catégories A et B, passe d'environ 10 % en 1992 à 80 % en 2003. Cette mesure a évidemment l'avantage d'être peu contraignante et surtout peu coûteuse puisqu'elle se contente d'imposer l'information du consommateur dans la compétition commerciale, mais elle risque de ne pas être suffisante pour des produits comme l'informatique, les téléviseurs ou les automobiles, pour lesquels la consommation énergétique n'est pas forcément le critère d'achat le plus important pour les consommateurs.

L'autre politique mise en place par l'Union européenne consiste à négocier des accords volontaires avec les producteurs de produits manufacturés (automobile, consommation en mode « veille » des téléviseurs et des magnétoscopes), avec des objectifs dans le temps. L'accord volontaire permet aux industriels d'éviter une réglementation plus contraignante et à l'Union de suivre l'évolution du marché sur les produits relevant de ces accords. Mais l'aspect « volontaire » signifie qu'aucune mesure n'est prévue quand les objectifs ne sont pas atteints.

La maîtrise, un enjeu socio-organisationnel

La maîtrise de l'énergie est certes un sujet difficile car il recouvre une multitude d'objets et donc d'acteurs (il est plus simple de traiter des enjeux de la production énergétique car les acteurs et les technologies sont plus rapidement identifiés), même si

les solutions techniques sont éventuellement plus simples. Une autre difficulté réside dans le fait que gérer l'énergie implique souvent des évolutions socio-organisationnelles importantes.

Au-delà de l'optimisation des « briques de base » énumérées plus haut, qui consomment l'énergie, repenser la consommation énergétique pour une meilleure maîtrise autour des usages amène à s'interroger sur l'optimisation du système de production / consommation autour de chaque usage et la « récupération » d'énergie autour des usages.

Un exemple simple est celui de la micro-cogénération, soit la production conjointe de chaleur et d'électricité pour une maison ou un immeuble. Toute chaudière pourrait être remplacée par un moteur ou une turbine à gaz et ultérieurement par une pile à combustible haute température (une autre piste est la thermoélectricité où les émissions lumineuses du foyer de combustion de la chaudière sont récupérées par des cellules photovoltaïques, qui est une voie testée par General Electric), produisant à la fois la chaleur et l'électricité. Le rendement pour la production de chaleur et d'électricité est meilleur que si la chaleur et l'électricité sont produites séparément²². Mais ces systèmes vont rencontrer deux problèmes pour leur diffusion dans l'habitat si l'appareil est réglé sur les besoins de chaleur :

— le premier, technique et commun à une utilisation plus intensive et diffuse d'énergies renouvelables

22. « Cogénération et émissions de CO₂ ». *Les Cahiers du CLIP*, n° 15, janvier 2004.

intermittentes, est lié au fait que le réseau électrique a été conçu pour distribuer l'énergie des centrales vers les lieux de consommation, et non pour accepter des quantités importantes d'électricité « décentralisée » à redistribuer ;

— le second tient au fait que les installateurs d'appareils de chauffage ne sont pas forcément en mesure de prendre en charge la partie électrique du système et son raccordement au réseau.

La production de froid est aussi un sujet intéressant dont l'enjeu n'est pas négligeable puisque plus de 20 % de l'électricité utilisée dans l'industrie le sont pour la production de froid et d'air comprimé tandis que le tiers de la consommation électrique des ménages est utilisé pour des appareils de froid. La production de froid, que ce soit pour les réfrigérateurs, les congélateurs ou la climatisation est majoritairement électrique. Pourtant, il existe d'autres moyens de générer du froid.

Des technologies comme les pompes à chaleur réversibles permettent de transformer la chaleur en froid au niveau d'un bâtiment, avec un meilleur rendement énergétique qu'une climatisation électrique classique. Il est également possible d'utiliser l'énergie des dispositifs de cogénération pour fabriquer du froid par compression ou absorption, et produire de l'eau fraîche servant à alimenter un réseau de climatisation ou des industries en ayant besoin (brasseries, laiteries...). La trigénération à la fois d'électricité, de chaleur et de froid avec le même moyen de production (moteur, turbine...) permet une meil-

leure efficacité énergétique que si la chaleur, l'électricité et le froid sont produits séparément. Par conversion de la chaleur en froid, le solaire thermique pourrait peut-être trouver aussi des débouchés mieux adaptés à son intermittence (on a davantage besoin de froid quand il y a du soleil).

Pourtant, là encore, sans nier les développements techniques qu'il reste à faire pour promouvoir le développement industriel et commercial de ces technologies, une difficulté majeure est probablement d'assembler les compétences d'industriels qui n'ont pas de raison à court terme de travailler ensemble et peuvent même se percevoir comme des concurrents.

Quelles que soient les solutions techniques, maîtriser la consommation d'énergie à confort équivalent ou amélioré va nécessiter des fonctions de régulation et de communication permettant de gérer de façon transparente pour l'utilisateur, soit différentes sources d'énergie pour un usage, soit la consommation des appareils en fonction de l'usage effectif qu'il en fait. Les « objets intelligents », c'est-à-dire l'intégration des technologies de l'information et de la communication aux appareils de consommation, pourraient donc devenir incontournables au-delà des systèmes de programmation et des thermostats d'ambiance qui pilotent déjà souvent le chauffage de l'habitat.

Objets intelligents

Les objets intelligents intègrent des fonctions de régulation, programmation et communication. Le coût des dispositifs électroniques à

la base de ces fonctions est en constante diminution (doublement de la puissance des composants électroniques tous les 18 mois pour un coût équivalent, ou loi de Moore, qui devrait se poursuivre pendant une dizaine d'années encore, avant de buter sur des seuils physiques²³) et ceci devrait permettre de les utiliser plus fréquemment. La régulation de la chaleur de l'habitat a constitué la première étape d'un chauffage intelligent.

Compte tenu de l'ubiquité de l'électronique qui pourrait être combinée à des systèmes de communication, d'autres fonctions visant à optimiser la gestion de l'énergie tout en apportant davantage de confort pourraient être imaginées. Elles autoriseraient par exemple des économies d'énergie par la programmation automatisée de certaines demandes aux heures creuses (sèche-linge, chauffe-eau...), la programmation de températures différenciées suivant les pièces dans l'habitat. Les systèmes programmés pourraient être associés à des détecteurs de présence permettant l'arrêt automatique d'écrans quand plus personne n'est dans la pièce, de lumières ou de veilles inutiles (consommation résiduelle ou hors fonctionnement d'appareils tels qu'un lecteur DVD, la télévision, l'ordinateur, le *hub* pour le baladeur et l'appareil photo numérique...). À noter que l'enjeu des veilles des appareils (la consommation unitaire est certes faible mais

permanente et multipliée par le nombre d'appareils) n'est pas négligeable, puisque l'AIE estime que la consommation des veilles représente 5 % à 11 %, selon les pays, de la consommation électrique des ménages²⁴.

Les véhicules utilisent des fonctions « intelligentes » pour optimiser le contrôle moteur, la prestation de conduite et le contrôle de trajectoire. L'évolution majeure est qu'ils peuvent aujourd'hui communiquer avec le monde extérieur (radars, GPS²⁵, transpondeurs...) : ces nouvelles fonctions intégrées aux véhicules ouvrent des voies nouvelles quant à l'utilisation de l'automobile. Une voiture à pilotage automatisé est envisageable dans les 30 à 50 prochaines années. Ces fonctions faciliteraient aussi le développement de nouveaux services de mobilité où la voiture devient un service de transport et sa possession n'est plus indispensable, ou encore la gestion de la distribution de marchandises et son optimisation en temps réel.

Ces mêmes objets communicants peuvent aussi bien être utilisés de façon plus coercitive, ce qui n'est évidemment pas le plus souhaitable, c'est-à-dire en contraignant à distance les véhicules à ralentir (les brider ne demande aucune évolution technologique) ou en lisant leur « boîte noire » embarquée pour détecter les infractions. D'après l'INRETS (Institut national de re-

23. Voir COLIN Jean-Paul. « Informatique, l'après-Moore ». *Futuribles*, n° 294, février 2004, pp. 5-16.

24. Voir la présentation de l'AIE par Alan Meier, à l'*International Standby Power Conference*, site Internet www.standbyforum.co.kr.

25. *Global Positioning System*.

cherche sur les transports et leur sécurité), pour un même modèle, tout accroissement de la vitesse de pointe de 10 km/h se traduit par une augmentation de la consommation réelle de 0,4 à 0,7 litre aux 100 km en ville et de 0,2 à 0,3 litre au 100 km en usage routier.

Enfin, les objets communicants peuvent permettre une meilleure gestion du trafic (ce qui commence à être le cas avec les ordinateurs embarqués et l'« info-traffic » ou les panneaux indicateurs qui avertissent des difficultés de circulation) car rien n'est plus désastreux pour la consommation énergétique qu'un embouteillage : le carburant est consommé et le service n'est pas ou mal rendu.

L'industrie a déjà intégré ces fonctions de régulation et de communication pour ses processus internes (automatisation du processus de production), mais des progrès importants sont encore possibles dans le secteur tertiaire.

Le réseau électrique, lui-même, aurait besoin d'intelligence pour réagir aux demandes et aux apports de sources plus décentralisées et intermittentes. L'enjeu est difficilement chiffrable, ces fonctions dédiées ou qui intègrent la maîtrise énergétique à une autre fonction sont pour l'essentiel à inventer, elles ont fait l'objet de peu d'études.

D'une façon générale, les fonctions de communication, de régulation et de programmation sont une pièce indispensable à la gestion des flux énergétiques pour tous les usages, l'habitat et le tertiaire, l'industrie et le transport.

La gestion des flux énergétiques

Maîtriser la consommation d'énergie tout en continuant à améliorer le niveau de confort requiert de repenser l'habitat, l'automobile ou l'usine autour de leurs besoins globaux. Il s'agit d'un champ de recherche transversal, d'ingénierie énergétique, qui intègre le progrès technologique dans tous les domaines, y compris les techniques d'information et de communication, autour d'un objet (automobile, réseau électrique, bâtiment, industrie).

La gestion de système au niveau du bâtiment

La gestion de système permettrait l'utilisation optimisée de sources d'énergie complémentaires, pour la chaleur comme pour l'électricité, mais d'origines différentes, pour l'habitat. Par exemple, l'électricité issue d'une production individuelle comme la cogénération par une pile à combustible (dont la production est réglée sur les besoins de chaleur) ou de tuiles photovoltaïques et du réseau électrique. Si les technologies de base sont relativement connues, l'optimisation au niveau du bâtiment est particulièrement complexe en termes de conception. En effet, selon que le bâtiment a un usage résidentiel, tertiaire ou industriel, qu'il s'agit d'un habitat individuel ou collectif, neuf ou en rénovation, qu'il est situé en zone urbaine dense ou en zone rurale, que la zone de localisation bénéficie de ressources spécifiques de vent, de soleil, de géothermie, de bois ou de déchets de biomasse, les solutions optimisées pour une moindre consommation

d'énergie (en particulier d'énergie émettrice de carbone) profitant mieux des spécificités locales sont extrêmement diverses. Cette diversité des situations requiert l'élaboration de grilles de conception adaptées non seulement à la diversité des bâtiments, mais aussi aux spécificités locales. Là encore, la diversité des acteurs pouvant intervenir dans le secteur du bâtiment pose la question de l'architecte ou du maître d'ouvrage « énergétique » qui serait capable d'optimiser les solutions énergétiques pour chaque bâtiment²⁶.

La gestion de système au niveau de l'industrie

Les processus industriels actuels sont déjà techniquement très optimisés pour une moindre consommation énergétique, dans les industries lourdes comme la chimie ou la sidérurgie. Aussi, les voies de progrès et de profits pour les entreprises tiennent encore plus à des collaborations entre acteurs :

— L'analyse du processus industriel, en cherchant à valoriser les coproduits (électricité pour la chimie, déchets de biomasse pour les industries agroalimentaires...), en identifiant les opportunités d'utilisation d'énergies renouvelables selon les sites d'implantation et le *process*, est une piste de bon sens. La valorisation des coproduits renvoie au concept d'écologie industrielle²⁷ qui permet à des entreprises différentes d'échanger de manière lucrative pour cha-

cune matière, eau et énergie. Des exemples de parcs industriels étant parvenus à maximiser les échanges (économie de ressources pour les uns et vente de déchets pour les autres), tout en diminuant les rejets dans l'écosystème, existent dans le monde entier. L'exemple le plus abouti et le plus documenté est le parc industriel de Kalundborg au Danemark, dont les échanges permettent de réduire la consommation de pétrole et de charbon, respectivement de 45 000 et de 15 000 tonnes par an. Les économies annuelles sont estimées à 10 millions de dollars US.

— L'analyse du cycle de vie des produits permettant ainsi de réduire le CO₂ énergétique et / ou le CO₂ de processus (inhérent à la réaction chimique), voire les émissions d'autres gaz à effet de serre liées au processus : recyclage de la ferraille pour la sidérurgie, matériaux du bâtiment à moindre contenu en CO₂ pour les cimentiers ou utilisation de biomasse au lieu d'hydrocarbures pour produire un matériau comme le Rilsan, fabriqué à base d'huile de ricin.

La gestion de système automobile

Comme déjà mentionné plus haut, l'augmentation de la consommation électrique des automobiles est relativement récente et des progrès importants peuvent être réalisés sur le rendement électrique de toutes les fonctions consommatrices. La gestion de l'énergie à bord s'avère indispensable pour concevoir un

26. Voir également MAUGARD Alain, VISIER Jean-Christophe et QUÉNARD Daniel. « Le bâtiment à énergie positive ». *Futuribles*, n° 304, janvier 2005, pp. 39-55.

27. Voir ADOUE Cyril et ANSART Arnaud. « L'essor de l'écologie industrielle. Une avancée vers le développement durable ». *Futuribles*, n° 291, novembre 2003, pp. 51-67.

véhicule hybride, mais optimiserait déjà la consommation d'un véhicule thermique : l'énergie de freinage pourrait être récupérée, l'intégration de cellules solaires (un toit ouvrant photovoltaïque) n'est pas inimaginable, la chaleur du moteur pourrait-elle rafraîchir aussi le véhicule en été au lieu d'utiliser une climatisation électrique ? La gestion de l'énergie à bord compte tenu de l'évolution de la demande de puissance (passage au 36 et 42 V), liée à l'électrification progressive des fonctions du véhicule (*drive by wire*), pourrait être une opportunité pour repenser l'automobile autrement que comme un habitacle consommateur posé sur une base motrice et productrice de l'énergie.

Les services

Enfin, l'organisation des activités économiques elle-même peut être une source d'efficacité énergétique.

Les normes de recyclage ont contraint les industriels à s'intéresser davantage aux cycles de vie complets de leurs produits. Ceci a même amené certains d'entre eux à faire évoluer leur offre d'un produit vers un service²⁸ (location plutôt que vente), qui a l'intérêt non seulement de favoriser le recyclage et d'économiser la matière première, mais de permettre au client de disposer au plus vite du meilleur produit. Quant au producteur, il lisse son chiffre d'affaires avec des « loyers » plus réguliers que les ventes et peut souvent assembler plusieurs ser-

vices pour accroître ce chiffre d'affaires. Il est difficile de dire aujourd'hui quels seraient les gains énergétiques si nous n'achetions plus une machine à laver mais si elle était incluse dans les charges et payée au lavage, si l'automobile était louée et payée en fonction du kilométrage parcouru....

De même, des tendances comme la production de produits « à la demande » ou personnalisés en fonction des souhaits de chaque client, contraignent à les assembler à proximité des lieux de consommation et pourraient limiter non seulement la délocalisation de la production mais aussi le transport de ces objets.

**

Tous les scénarios de réduction des émissions de gaz carbonique pour limiter l'effet de serre et le réchauffement climatique dans des limites « acceptables » pour les scientifiques, requièrent une plus grande maîtrise de la consommation énergétique.

Les progrès envisageables en termes de rendement des prochaines générations de chaudières, de centrales thermiques, quel qu'en soit le combustible, de centrales nucléaires ou de cellules photovoltaïques, sont accessibles dans la littérature énergétique. Les *mix* énergétiques possibles susceptibles de réduire les émissions ont également fait l'objet de nombreuses études à l'échelle nationale comme à l'échelle régionale

28. Cf. l'exemple de Michelin dans l'article de Dominique Bourg et Nicolas Buclet, « L'économie de la fonctionnalité. Changer la consommation dans le sens du développement durable ». *Futuribles*, n° 313, novembre 2005, pp. 27-37.

ou mondiale. Il s'avère d'ailleurs que l'un des principaux verrous technologiques susceptibles de radicalement optimiser le paysage de la production énergétique pour limiter les émissions de gaz à effet de serre serait la capacité à stocker l'électricité en plus grande quantité (évolution clef pour l'automobile à propulsion électrique, mais aussi pour un usage plus intensif des énergies renouvelables intermittentes et du nucléaire). Mais en dehors d'une telle rupture technologique, la maîtrise de l'énergie semble incontournable. Cependant, les voies technologiques et socio-organisationnelles de maîtrise de la consommation énergétique tout en offrant le même service, et pourquoi pas un service amélioré, sont, en comparaison des technologies de production, très peu étudiées.

Pourtant, en raison d'un renouvellement généralement plus rapide des objets qui consomment l'énergie que des systèmes de production, s'intéresser au progrès technologique des convertisseurs énergétiques apparaît comme du simple bon sens. Ceci d'autant que si l'innovation tire la compétition entre les industriels, la promotion du progrès des nombreux secteurs d'activités concernés par les divers convertisseurs énergétiques pourrait conférer à l'industrie française ou européenne des avantages compétitifs stratégiques.

Mais, étrangement, le sujet de la maîtrise de l'énergie reste idéologiquement associé à un frein à la croissance et en conséquence apparaît généralement comme un vœu pieux. Certes, des mesures ont été prises pour labelliser la consommation énergétique des objets de consommation et l'idée de réglementer la consommation des « veilles » de divers appareils commence à faire son chemin²⁹. Mais au-delà, il faudra bien ouvrir de nouvelles pistes de recherche dans le domaine de l'énergie pour évaluer :

— ce que seraient l'électronique, les écrans, des actionneurs ou des petits moteurs électriques à faible consommation ;

— comment « l'intelligence » incorporée par le biais de l'électronique dans l'automobile, le tertiaire ou l'habitat, voire le réseau électrique, pourrait contribuer à offrir plus de prestations tout en réduisant la consommation énergétique ;

— comment repenser la production / consommation d'énergie pour une meilleure efficacité autour des grands objets que sont la maison ou le bureau et ses équipements, l'automobile...

— ce que de nouvelles organisations de production, de nouveaux services pourraient apporter en termes de maîtrise de l'énergie.

29. La tenue en novembre 2005 d'un forum mondial à Séoul sur la consommation en veille des appareils électriques est un signe d'une prise de conscience plus large de l'enjeu de l'efficacité énergétique.

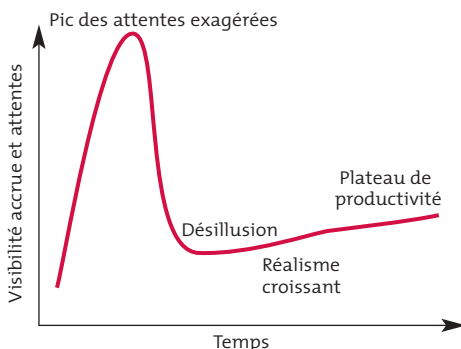
IDÉES & FAITS

PORTEURS D'AVENIR

2006 : année « *blogs* et politique »

Les *blogs* sont à la mode, c'est un fait. Et tout le monde succombe à cette mode, y compris Futuribles International dans son nouveau dispositif de veille mutualisée sur l'environnement stratégique des entreprises et des organisations. Sans épiloguer sur les nombreux avantages et intérêts de ces outils, il convient de garder la tête froide quant à leur utilité et à leur avenir. Comme tout outil à la mode, il suivra probablement la « courbe du Hype » de Gartner : après le pic des attentes exagérées, les *blogs* connaîtront probablement leur « creux de désillusion ».

La courbe du Hype des nouvelles technologies de l'information



Source : The Gartner Group.

Cela n'interdit pas de s'interroger sur leur rôle et leur impact sur les formes futures de communication par Internet, qui risquent d'être phénoménaux. Ainsi en est-il du domaine politique : en novembre 2004, l'élection présidentielle aux États-Unis a vu l'explosion des *blogs* politiques ayant un impact très fort sur la campagne — citons les sites www.talkingpointsmemo.com ou www.dailykos.com (Daily Kos, un « blogueur » pro-Kerry, recevait entre 500 et 600 000 visites par jour en octobre 2004). Un blogueur célèbre a même reçu, le jour des présidentielles américaines, plus de visites que le site du *New York Times*.

La France n'a pas spécialement de retard sur les États-Unis dans le domaine des *blogs*, mais les blogueurs vedettes (comme Loïc Le Meur, www.loiclemeur.com/france) n'y parlent pas spécifiquement de politique.

Certains hommes politiques se sont mis très tôt au *blog* — parmi les pionniers, citons Dominique Strauss-Kahn (<http://dsk.typepad.com>) et Alain Juppé (www.alijup.com) — mais au départ sans respecter totalement l'esprit du *blog* et sans y appliquer de « plan » adapté. Les choses ont évolué et ces deux *blogs* politiques sont aujourd'hui mieux pensés.

Récemment, deux hommes politiques ont utilisé les *blogs* dans une optique cette fois directement politique. Le premier est un habitué des hautes technologies, il s'agit du maire d'Issy-les-Moulineaux, André Santini, qui a publié le 21 novembre 2005, sur son *blog* (www.santini-andre.com), une « Adresse au Premier ministre pour Austerlitz » dans laquelle il déplore que la date du 2 décembre ne fasse pas l'objet d'une célébration officielle. Le second est le ministre de l'Intérieur, Nicolas Sarkozy, qui peut sûrement être crédité d'être le premier homme politique français à avoir utilisé la technique des commentaires pour répondre sur un *blog*.

Suite à un billet du 17 novembre du cinéaste Matthieu Kassovitz sur son *blog* (www.mathieukassovitz.com/blog), intitulé « La France d'en bas... », Nicolas Sarkozy a en effet signé une réponse relativement longue, noyée au milieu des quelques centaines de commentaires anonymes ou signés par « Pracci 2004 », « Un banlieusard », « Fox apoildur », etc. Interrogé par des journalistes et des blogueurs (www.pointblog.com), le cabinet du ministre a confirmé que le commentaire venait bien du ministère (en effet, pour le moment, les technologies d'identification des auteurs de commentaires sont balbutiantes ; d'ailleurs, plus haut dans les commentaires, on trouve un autre Nicolas Sarkozy, celui-ci étant visiblement un usurpateur).

Il paraît évident que les *blogs*, c'est-à-dire des formes d'expression beaucoup plus directes que les sites institutionnels, vont avoir un rôle fondamental dans la précampagne de l'élection présidentielle française de 2007. L'année 2006 sera donc probablement l'année des *blogs* poli-

tiques en France. Les médias traditionnels vont devoir prendre l'habitude de citer des sources en ligne...

Geoffrey Delcroix

Source complémentaire : RAINIE Lee, CORNFIELD Michael et HARRIGAN John. *The Internet and Campaign 2004*. Washington, D.C. : Pew Research Center, 2005, 17 p.

Malthus et les inondations en Asie

Chaque année, des inondations catastrophiques font des millions de miséreux au Bangladesh, au Cambodge, en Chine, en Inde, en Thaïlande, au Viêt-nam et dans toutes les terres basses d'Asie. On attribue généralement ces désastres à la déforestation des zones boisées en hauteur, les forêts régulant les inondations en fonctionnant comme des éponges géantes. Les racines, les sols et la couche de feuilles absorbent l'eau durant les fortes pluies, retardant ou même empêchant l'écoulement vers les cours d'eau voisins. Mais selon un récent rapport des Nations unies ¹, cela serait inexact.

Selon ce rapport, le rôle des forêts sur les fortes inondations serait limité. Il est vrai que, localement, les arbres peuvent réduire le volume d'eau arrivant dans les cours d'eau ou au moins étaler son arrivée dans le temps. Cependant, cela ne vaut

1. *Forêts et inondations : la fiction ou les faits ?* Bogor (Indonésie) : Centre de recherche international sur la forêt, centre dédié à la conservation des forêts et au développement humain ; travail réalisé en collaboration avec des équipes internationales et publié par la FAO (Food and Agriculture Organization), Rome, 2005.

que pour des durées relativement réduites et des pluies fines tombant sur de faibles étendues. Si la pluie est abondante, prolongée et couvre une grande surface, la présence d'arbres n'empêchera pas les inondations catastrophiques. Cela parce que les inondations majeures se produisent le plus souvent à la fin de la saison humide, lorsque des pluies diluviennes tombent sur des zones saturées en eau (c'est-à-dire quand l'éponge géante que forme la forêt est saturée).

Dans ces conditions, l'inondation est inévitable. Non seulement il est impossible de l'empêcher, mais en le faisant on se priverait de ses bénéfices. L'inondation est en effet utile pour le maintien de la biodiversité et la préservation des stocks de poissons. Elle restaure également la fertilité des sols inondés, sur lesquels les agriculteurs peuvent planter des espèces immergées.

Les auteurs du rapport remettent également en question l'idée selon laquelle la présence d'arbres prévient les glissements de terrain catastrophiques. Il est vrai que les racines des arbres peuvent emprisonner des sols mouvants, mais seulement pour des épaisseurs inférieures à un mètre. Si le sol en glissement dépasse trois mètres, la présence d'arbres ne suffira pas à empêcher l'effondrement.

Alors, si l'on ne peut blâmer la disparition des forêts de montagne, où chercher la cause des inondations désastreuses ? Le rapport avance que la cause principale réside dans la croissance des populations et de leurs activités économiques. Villes et bourgades ont été construites depuis longtemps dans des plaines inondables, en dépit du risque d'inondations périodiques. Ceci parce que les nombreux avantages

sociaux et économiques d'une vie proche de l'eau tendent à dépasser les risques associés.

Historiquement, de tels établissements se limitaient aux parties supérieures des plaines inondables. Mais avec la croissance des villes, de nouveaux lotissements et des zones commerciales ont été construits sur les parties inférieures.

L'inondation du Yangzi en Chine, en 1998, a causé pour 30 milliards de dollars US de dégâts. D'autres inondations, au Cambodge et au Viêt-nam ont causé, en 2000, respectivement 145 et 285 millions de dollars US. Globalement, les inondations affectent plus de 60 millions de personnes par an. Pourtant, l'évaluation de leur gravité en termes de pertes économiques plutôt qu'en termes d'extension géographique donne l'impression qu'elles sont récemment devenues de plus en plus graves. En réalité, les pertes économiques énormes qu'elles ont engendrées ces dernières années sont le reflet de la croissance économique, des investissements en infrastructures et de la croissance rapide des populations vivant en zone inondable.

Les inondations ne sont pas plus fréquentes de nos jours qu'il y a 120 ans, lorsque abondaient les forêts luxuriantes : il y a maintenant plus de gens qui vivent et travaillent dans des zones inondables.

Bernard Mély (Asie 21, Futuribles)

Source : The Economist, 15 octobre 2005.

Cyberterrorisme et sécurité informatique

Au début du mois d'octobre 2005, le gouvernement japonais a annoncé que pour la première fois, figure-

CONDITIONS DE TRAVAIL

RÈGLEMENT INTÉRIEUR FIXANT LES CONDITIONS DE TRAVAIL DES EMPLOYÉS DE BUREAU D'UNE USINE DE CHAUMONT (1830) : HEUREUSEMENT, LES TEMPS ONT CHANGÉ...

1. Piété, propreté et ponctualité font la force d'une bonne affaire.
2. Notre firme ayant considérablement réduit les horaires de travail, les employés de bureau n'auront plus à être présents que de 7 heures du matin à 6 heures du soir et ce, les jours de semaine seulement.
3. Des prières seront dites chaque matin dans le grand bureau. Les employés de bureau y seront obligatoirement présents.
4. L'habillement doit être du type le plus sobre. Les employés de bureau ne se laisseront pas aller aux fantaisies des vêtements de couleurs vives. Ils ne porteront pas de bas non plus, à moins que ceux-ci ne soient convenablement raccommodés.
5. Dans les bureaux, on ne portera ni manteau ni pardessus. Toutefois, lorsque le temps sera particulièrement rigoureux, les écharpes, cache-nez et calottes seront autorisés.
6. Notre firme met un poêle à la disposition des employés de bureau. Le charbon et le bois devront être enfermés dans le coffre destiné à cet effet. Afin qu'ils puissent se chauffer, il est recommandé à chacun des membres du personnel d'apporter chaque jour quatre livres de charbon pendant la saison froide.
7. Aucun employé ne sera autorisé à quitter le bureau sans la permission de Monsieur le Directeur. Les appels de la nature sont cependant permis. Aussi, pour y céder, les membres du personnel pourront utiliser le jardin au-dessous de la seconde grille. Bien entendu, cet espace devra être tenu dans un ordre parfait.
8. Il est strictement interdit de parler durant les heures de bureau.
9. La soif de tabac, de vin ou d'alcool est une faiblesse humaine et, comme telle, est interdite à tous les membres du personnel.
10. Maintenant que les heures de bureau ont été énergiquement réduites, la prise de nourriture est encore autorisée entre 11 h 30 et midi mais, en aucun cas, le travail ne devra cesser durant ce temps.
11. Les employés de bureau fourniront leurs propres plumes. Un taille-plumes est disponible, sur demande, auprès de Monsieur le Directeur.
12. Un senior, désigné par Monsieur le Directeur, sera responsable du nettoyage et de la propreté de la grande salle, ainsi que du bureau directorial. Les juniors et les jeunes se présenteront chez Monsieur le Directeur quarante minutes avant les prières et resteront après l'heure de fermeture pour procéder au nettoyage. Brosses, balais, serpillières et savon seront fournis par la direction.
13. Augmentés dernièrement, les nouveaux salaires sont les suivants : Cadets (jusqu'à 11 ans), 0 franc 50 ; juniors (jusqu'à 14 ans), 1 franc 45 ; employés, 7 francs 50 ; seniors (après 15 ans de maison), 14 francs 50.
Les propriétaires reconnaissent et acceptent la générosité des nouvelles lois du travail, mais attendent du personnel un accroissement considérable du rendement en compensation de ces conditions presque utopiques.

Source : archives Futuribles.

rait au budget de la prochaine année fiscale le financement d'un programme de simulation d'une cyberattaque à l'échelon national. Des attaques de cyberterroristes fictifs seront simulées contre les réseaux informatiques de l'administration et des entreprises, dont les banques et les compagnies aériennes, afin d'évaluer les menaces pesant sur les systèmes informatiques du pays.

Pendant la simulation, les participants installeront des serveurs fictifs dotés du même contenu que les originaux. Ces leurres (ou « pots de miel ») seront exposés aux attaques d'experts de la sécurité informatique qui joueront le rôle de cyberterroristes en cherchant à saturer les réseaux par déni de service. L'objectif de l'exercice, tel qu'il a été officiellement présenté, est de permettre aux experts de détecter les failles de sécurité informatique et de tester la capacité des participants à restaurer le fonctionnement de leurs réseaux.

L'exercice sera placé sous la responsabilité du ministère des Affaires intérieures et des Communications, et inclura la participation des institutions financières, des entreprises de communication, des fournisseurs de service Internet, et des administrations centrales et locales. Cette première simulation sera suivie par plusieurs exercices qui se dérouleront sur une période de trois ans, afin d'améliorer la capacité des administrations et des entreprises à faire face à de telles attaques.

En avril 2005, avait été créé le Centre national pour la sécurité informatique, destiné à assurer la protection des sites Internet du gouvernement. Selon Naoki Miyagi, chargé de présenter ce nouvel organisme, le Japon est longtemps resté à la traîne d'autres pays en matière

de sécurité informatique. Le centre nouvellement créé ne comptait en juillet 2005 que 37 employés, soit un effectif qui reste très inférieur à celui des structures françaises (100 personnes) ou américaines (800 personnes) dédiées à ce type de mission¹.

Les cyberattaques peuvent compromettre le bon déroulement des activités des entreprises et des administrations en altérant le contenu des pages *Web*, en effaçant les données et en bloquant les processus. Au Japon, un nombre croissant d'entreprises et d'administrations sont victimes de ce type de perturbations. Kakaku.com, premier site japonais comparateur spécialisé dans les produits de consommation, a ainsi dû faire l'objet d'une fermeture temporaire après qu'il eût été piraté. En 2005, dans le contexte des litiges territoriaux maritimes et de la querelle des manuels d'histoire, opposant plusieurs pays d'Asie orientale, des *hackers* chinois et sud-coréens se sont attaqués au site du Premier ministre, à celui du ministère des Affaires étrangères et à celui de l'Agence de défense japonaise.

Dans la suite des événements du 11 septembre 2001, les États-Unis avaient fait de la menace du cyberterrorisme une question prioritaire, préoccupation traduite par la création d'un poste de conseiller spécial du président des États-Unis pour la sécurité dans le cyberspace et la publication d'un document définissant une stratégie². Plusieurs simu-

1. McNICOL Tony. « Political Tensions in East Asia Mirrored Online ». Site Internet de la *Japan Media Review*, www.japanmediareview.com/japan/stories/050601mncicol.

2. *The National Strategy to Secure Cyberspace*, février 2003, site Internet de la Maison Blanche, www.whitehouse.gov/pcipb.

lations de cyberattaques, du type de celle qui se tiendra au Japon, ont déjà été effectuées aux États-Unis, la dernière en mai 2005 et baptisée « Horizon silencieux », destinée à évaluer les conséquences d'une attaque coordonnée sur l'administration et une partie de l'activité économique.

« Une souris peut devenir aussi dangereuse qu'une balle ou qu'une bombe » déclarait le représentant Lara Smith, au lendemain des attentats du 11 septembre 2001. « Parce que le cyberterrorisme ne se résume pas à une somme de malveillances », une synthèse publiée en 2003 sous l'égide de la délégation française aux affaires stratégiques (DAS) ³ plaide pour une gestion équilibrée de la menace cyberterroriste : « Le discours qui a présenté la menace cyberterroriste comme "la" menace au lendemain du 11 septembre 2001 a donc laissé la place à plus de réalisme. [...] La sécurité absolue des réseaux et des infrastructures est illusoire. Ce qui compte, c'est donc l'aptitude du ou des réseaux à remplir leur mission, y compris en cas d'attaques physiques ou logiques, de perturbations ou d'accidents. [...] La problématique du cyberterrorisme ne se résume donc pas au niveau de sécurité susceptible d'être opposé à des attaquants, mais à la définition d'une topologie suffisamment robuste et distribuée pour s'affranchir de coupures ou de dysfonctionnements partiels, comme c'est déjà en partie le cas. »

Yann Vinh

3. VACCA Virginie (Compagnie européenne d'intelligence stratégique, CEIS). *Infoguerre et cyberterrorisme*. Site Internet de la DAS, www.defense.gouv.fr/sites/das/dossiers/infoguerre_et_cyberterrorisme, janvier 2003.

Source : « Japan to Hold 1st Cyber-terror Exercises ». *The Daily Yomiuri*, 5 octobre 2005.

Inégalités persistantes dans les zones urbaines sensibles

Les données socio-économiques sur les zones urbaines sensibles (ZUS) ¹ fournies par le rapport 2005 de l'Observatoire national des zones urbaines sensibles (ONZUS), en France, dressent un tableau peu encourageant de ces quartiers difficiles. La dégradation ou la stagnation des indicateurs socio-économiques de ces zones entre 1990 et 1999, ne révèle pourtant pas toujours l'ampleur de la détérioration des conditions de vie des populations ; elle résulte pour une large part des changements induits par la mobilité résidentielle des populations des ZUS : 61 % de leurs habitants en 1990 habitaient un autre logement en 1999. Or, cette forte mobilité concerne essentiellement les catégories les plus aisées qui, après un passage en ZUS, accèdent bien souvent à la propriété dans d'autres quartiers, tandis que les moins diplômés, les plus touchés par le chômage, les immigrés et les femmes élevant seules leurs enfants, bref les couches les plus défavorisées, stagnent dans ces quartiers sensibles.

Le poids des populations les plus fragiles a crû dans ces quartiers entre 1990 et 1999, en effet le nombre d'arrivées en ZUS n'a pas compensé le nombre de départs. Et pourtant,

1. Les ZUS ont été instituées en 1995. Ce sont les territoires prioritaires de la politique française de la ville. Elles se caractérisent notamment par la présence de grands ensembles architecturaux et d'une forte proportion de chômeurs.

le fait d'arriver en ZUS peut être une façon d'améliorer ses conditions de logement, à un coût souvent moindre que dans les autres quartiers. Il est donc évident que les ZUS, pour d'autres raisons, apparaissent comme des zones fortement repoussoirs, dans lesquelles se concentrent toujours davantage les populations les plus fragiles. L'accentuation de ce phénomène, probable après les désordres récents, menace directement la cohésion sociale. Pour l'instant, et sans préjuger des effets des politiques mises en œuvre notamment dans le plan de cohésion sociale, l'homogénéité sociale de ces quartiers s'accroît et la « fracture sociale » au niveau national se creuse.

Sans surprise, les ZUS connaissent un taux de chômage impressionnant : pour les 15-59 ans, il atteint 21 %, le double d'une moyenne nationale déjà élevée. Parmi tous les facteurs qui distinguent ces ZUS du reste du territoire français², c'est bien cet accès limité à l'emploi qui paraît le plus structurant. Le fait d'être jeune, de sexe féminin ou immigré sont des facteurs « aggravants » qui font grimper ce taux de chômage à des sommets. Quelque 38 % des femmes immigrées d'origine non européenne sont ainsi au chômage dans les quartiers en difficulté, c'est aussi le cas de 36 % des hommes actifs et de 40 % des femmes actives de 15 à 25 ans.

La stabilisation des chiffres du chômage au niveau national pour l'année 2004 n'empêche pas qu'en ZUS, le nombre d'actifs ayant un emploi a baissé de 50 000 entre

2003 et 2004, dont 35 000 salariés en contrat à durée indéterminée et 10 000 stagiaires ou actifs bénéficiant d'un emploi aidé³. Ces chiffres, parmi d'autres, manifestent, en outre, la fragilité de l'emploi de ceux qui en ont un et la forte sensibilité à la réduction du niveau d'intervention de la politique de l'emploi qui s'est poursuivie en 2004.

L'un des objectifs du plan de cohésion sociale, mis en œuvre en France en février 2005 et dont il n'est donc pas encore possible de voir tous les effets sur le terrain, est d'atténuer la traduction géographique des inégalités sociales. Par exemple, le programme de rénovation urbaine se concrétise, d'après l'ONZUS, par 62 conventions pour la période 2005-2008 qui prévoient la destruction de 30 044 logements sociaux, la construction de 27 316 logements nouveaux, la réhabilitation de 53 669 logements et la « résidentialisation⁴ » de 50 155 autres. Reste à savoir si ces travaux de grande ampleur suffiront pour attirer et fidéliser des populations plus favorisées. Les facilités données à la création d'emplois peuvent certainement enclencher une dynamique positive, mais il est encore trop tôt pour juger de l'efficacité réelle et sur le long terme de la création des zones franches urbaines (ZFU) ou des zones de redynamisation urbaine (ZRU). Il est cela dit certain qu'en attendant

2. Notons au passage que les chiffres du chômage semblent bien plus pertinents pour identifier ces quartiers que le niveau d'insécurité, même si on y note une surdélinquance limitée.

3. Le nombre de demandeurs d'emploi en catégorie 1 (contrats à durée indéterminée à plein temps) a cependant baissé ! Le nombre de demandeurs d'emploi exerçant des activités occasionnelles ou réduites (vocabulaire de l'Agence nationale pour l'emploi) a, lui, progressé de 8,1 % dans les ZUS en 2004.

4. Résidentialisation : requalification des espaces pour en faciliter l'usage, en améliorer l'image et y accroître la sécurité.

les résultats tangibles de ces initiatives, le désengagement visible de l'État dans ces quartiers sensibles n'était pas opportun puisqu'il est intervenu lors d'une phase d'accroissement de la ségrégation sociale.

François de Jouvenel

Sources : Rapport 2005 de l'ONZUS, site Internet www.ville.gouv.fr ; *La lettre de la DIV (Délégation interministérielle à la ville)*, n° 106, octobre 2005 ; plan de cohésion sociale, site Internet www.cohesion.sociale.gouv.fr.

Les nouveaux paysans

La fin des paysans a bien eu lieu suivant la démonstration anticipatrice du livre célèbre d'Henri Mendras¹ : passage d'une agriculture traditionnelle, vieille de millénaires et de structures essentiellement familiales, à une agriculture scientifique guidée par des ingénieurs agricoles et stimulée par une gestion liée aux engrais chimiques — et déjà, dans plusieurs pays, par le recours massif à la transgénèse (les organismes génétiquement modifiés, OGM, dans le cas du soja et du maïs). S'il est impossible d'en minimiser l'efficacité productiviste, il demeure que ce choix d'agronomie a conduit au démantèlement des familles paysannes et à la concentration des terres aux mains d'un petit nombre de grands propriétaires. Efficacité incontestable, certes, mais dont le coût social (le déracinement) a été aussi élevé que son coût écologique (pollutions liées aux produits de synthèse, et réduction de la diversité végétale et animale).

1. MENDRAS Henri. *La Fin des paysans*. Paris : SÉDÉS (Société d'études et de documentation économiques, industrielles et sociales) (coll. *Futuribles*), 1967.

Dans cette perspective des paysans appelés à disparaître, « résidus de l'histoire » étrangers à toute modernité, l'agriculture industrialisée — en fait, l'industrie agroalimentaire envahissant de part en part l'espace rural — est devenue un secteur économique soutenu partout, aux États-Unis comme en Europe, par des subventions et crédits considérables (voir la PAC, la politique agricole commune, qui représente plus de la moitié des subventions de la Commission européenne). Industrialisation et modernisation en font le secteur le plus politiquement protégé, de sorte que, curieusement, quand le Premier ministre britannique, Tony Blair, invoque non sans raison d'autres priorités pour l'avenir de l'Union européenne — la recherche, l'éducation, l'innovation dans les services — c'est pour faire apparaître à son tour ce secteur comme anachronique.

Face à cette agriculture devenue industrie, qui rencontre la contestation des associations de protection de l'environnement, mais aussi celle des consommateurs et même des représentants de la profession, il y a pourtant l'amorce d'une agriculture alternative, aussi soucieuse de préserver une relation pérenne avec la nature et les solidarités familiales, que de réduire au minimum déchets et pollutions. C'est le thème de la thèse d'Estelle Deléage, dont l'enquête montre combien les « nouveaux paysans », en France, ont déjà uni leurs forces en participant à divers mouvements associatifs, qui revendiquent des systèmes de production moins coûteux en intrants².

2. DELÉAGE Estelle. *Paysans. De la parcelle à la planète. Socio-anthropologie du Réseau agriculture durable*. Paris : Syllepse, 2004.

Ainsi, le réseau « Cohérence », qui réunit une centaine d'associations, a-t-il réussi à rassembler à Pontivy 8 000 participants réclamant « pour l'eau une autre agriculture », résolu à peser sur la réforme en cours de la PAC (en particulier pour contrer l'extension de la culture du maïs qu'encourage la prime au maïs ensilage). De plus, ces réseaux sont déjà organisés sur le plan européen, au sein de la Confédération paysanne européenne, qui représente 18 organisations paysannes et rurales de différents pays, ainsi que dans le cadre du RAD, le Réseau agriculture durable. Il va de soi que ces réseaux sont résolument hostiles à la diffusion des OGM.

Dans le numéro 31 de la revue *Écologie et politique* (octobre 2005), Estelle Deléage a étendu son analyse à l'échelle des pays en développement, dont la population est encore en grande majorité paysanne et rurale (malgré toutes les perspectives d'exode vers les villes), et plus vulnérable que jamais à la domination de l'agro-industrie occidentale. Le dossier qu'elle a dirigé, sous le titre « Paysans malgré tout ! », aussi passionnant que passionné, montre notamment qu'il existe, dans ces pays, une agriculture dont les pratiques, adaptées aux écosystèmes locaux, ne manquent pas de créativité.

L'innovation de cette alternative agroalimentaire vise à faire de la terre un moyen de vivre, le plus souvent encore moyen de survivre, plutôt que de l'exploiter comme un capital à rentabiliser. De quoi résister, écrit l'un des contributeurs, à l'extension sans fin « des grandes exploitations capitalistes spécialisées et expulsives ». Comme l'agriculture biologique qui impose de mieux en mieux ses produits aux consommateurs des pays industrialisés, l'innovation

de ces « paysans malgré tout » puise dans la tradition pour mieux construire l'avenir.

Mais, quelles que soient les manifestations de solidarité dont leur témoignent les nouveaux paysans des pays riches, le nombre des paysans traditionnels du tiers-monde et l'échelle des défis qu'ils doivent surmonter demeurent tout de même très différents des problèmes (et des promesses de marché) que rencontre « l'agrobiologique » dans les pays occidentaux. Force est bien de se demander jusqu'à quel point l'agronomie des « petites fermes » sera en mesure de relever ses défis.

Laurent Maintray

Paranoïa birmane

Le gouvernement birman vient de s'installer en un *week-end*, à la demande de la junte au pouvoir, à Pyinmana, localité perdue à 320 km au nord de Rangoon, sur la route de Mandalay.

Depuis plusieurs mois, on savait que des travaux étaient en cours pour ménager un abri aux chefs militaires, mais on ne s'attendait pas vraiment à un déménagement des ministères. Les fonctionnaires les premiers à déménager, Affaires étrangères par exemple, ont été avisés le vendredi soir qu'ils auraient à se trouver le lundi, sans leur famille, à Pyinmana. Rien n'ayant été prévu pour le mobilier, certains ont dormi à même le sol...

Depuis le 11 septembre 2001, les militaires au pouvoir à Rangoon vivaient dans la hantise d'une invasion américaine à l'irakienne et dans ce pays de rumeurs, une telle éventualité était annoncée pour le lendemain presque chaque mois. Évi-

demment, ce genre d'intervention directe paraît bien improbable, car il s'agirait pour la Chine voisine et tutélaire, soutien du régime, d'un *casus belli*.

En revanche, une tentative de soulèvement de la population de Rangoon avec le soutien des Américains (l'ambassade, même sans ambassadeur, est très étoffée et active) pourrait s'imaginer sous plusieurs formes (désobéissance civile, mouvements d'officiers subalternes voire supérieurs, les manifestations violentes étant difficilement imaginables après la répression sanglante de 1989).

Il n'est donc pas sûr que les despotes au pouvoir aient choisi la bonne tactique en s'enfermant dans un *bunker* loin de tout, car on peut imaginer une Birmanie « réelle » libérée dans les villes et une Birmanie « officielle » progressivement asphyxiée dans son nid d'aigle. On n'en est pas encore là car tout dépend de l'attitude de l'armée, dont une partie, notamment au niveau des officiers subalternes, est sans doute en proie à des états d'âme depuis le limogeage brutal et l'emprisonnement du général Khin Nyunt, ancien chef du renseignement militaire et Premier ministre, il y a un an. L'équipe de celui-ci était relativement ouverte à l'étranger et aurait peut-être pu ménager une transition douce vers un état de droit acceptable. Il faisait donc de l'ombre au chef suprême qui l'avait pourtant nommé.

Celui-ci, le général Than Shwé, chef de l'État, est, au contraire de Khin Nyunt, complètement enfermé dans une sorte d'autisme (ce n'est pas le premier, dans la lignée des chefs historiques de ce pays enclavé, au cours des siècles). À l'image des rois birmans fondateurs de dynastie, il semble vouloir créer une

nouvelle capitale qui immortaliserait son règne. Stratégiquement, il se pourrait aussi qu'il ait voulu transporter ses pénates en un lieu géographiquement plus proche (bien qu'en pleine « Birmanie profonde ») des foyers de rébellion encore à mater dans le pays karen et le pays shan, à une centaine de kilomètres à l'est de Pyinmana, loin d'un Rangoon cosmopolite et néocolonial, doté d'un port inquiétant puisque par nature ouvert sur le monde.

Les ambassades n'ont pas reçu d'instructions. L'avenir dira si contrôler le pays sera plus aisé pour la junte avec ce dispositif surprenant ou si ce n'est pas la dernière gesticulation, inspirée de la politique de l'autruche, d'une équipe complètement discréditée, même dans la région. L'ASEAN (Association des nations d'Asie du Sud-Est), qui la défend du bout des lèvres face aux Occidentaux, a décidé de « sauter » le tour de la présidence birmane en 2006, car on imaginait mal le prochain sommet de l'organisation au milieu des bois, à Pyinmana.

Jean Hourcade

Le droit humanitaire au pilori

Les diverses manifestations d'une légitimation croissante de la torture constituent-elles un signal faible ou une tendance lourde ? Il est temps de se poser sérieusement la question. On assiste en effet à un faisceau d'événements — principalement depuis le 11 septembre 2001 et l'introduction du mot d'ordre, désormais éculé mais toujours agité, de la guerre contre le terrorisme — qui indiquent que le droit international humanitaire (DIH) tend, sur ce point, à être battu en brèche.

En pratique, tout d'abord, de nombreuses informations récentes font état d'atteintes répétées, de la part d'États de droit, à l'interdiction absolue de la torture et autres traitements cruels, inhumains ou dégradants — notamment inscrite dans les conventions de Genève, le droit coutumier humanitaire et la Convention contre la torture. On songe aux prisons secrètes de la CIA (Central Intelligence Agency), aux scandales liés aux conditions de détention des suspects terroristes, ou encore aux contrats passés entre l'État américain et plusieurs gouvernements étrangers pour assurer l'immunité de ses forces d'interventions à l'égard du DIH.

Que de nombreux États (tous ?) agissent parfois contre ou malgré le droit, fût-ce au moyen de zones de non-droit, pour diverses raisons (notamment, mais pas seulement, sécuritaires) n'est pas nouveau, même si le « trou noir légal ¹ » s'est étendu. Ce qui l'est davantage, c'est la tentative à peine implicite pour inscrire **en droit** le recours à la torture. En somme, il s'agirait de transformer les entorses au droit en outils légaux.

Le rapport d'experts Schlesinger ² relatif aux opérations de détention du département américain de la Défense comportait déjà des orientations en ce sens, remettant en

cause le DIH. Certains, aux États-Unis, ne se cachent plus de vouloir s'affranchir des conventions de Genève, comme si les impératifs sécuritaires, quant à eux présumés, ne pouvaient souffrir que des normes universellement établies les supplantent. Si début octobre 2005, le Sénat américain a adopté par 90 voix contre 9 un amendement au budget de la Défense interdisant les traitements cruels, inhumains et dégradants dans les centres de détention américains, la Maison Blanche a menacé de mettre son veto à cet amendement et mène campagne auprès des sénateurs afin d'en exempter la CIA. Le Comité international de la Croix Rouge subit par ailleurs diverses pressions visant à remettre en cause la légitimité de son mandat, pressions ignorant avec superbe que les conventions de Genève (qui manquent de « dynamisme », pour reprendre le terme du rapport Schlesinger) engagent la totalité des États de la planète.

Remarquons au reste que, le fantasme de l'imminence et de l'omniprésence du terroriste ayant gagné les représentations, le recours à la torture comme moyen pour les « gentils » de vaincre les « méchants » ne semble plus franchement un tabou cinématographique. À considérer la fréquence de sa mise en scène, il s'agirait bien plutôt désormais d'une saine, pragmatique et virile disposition d'esprit des héros d'un nouvel âge (à la manière de Jack Bauer, dans *24 heures chrono*, série au demeurant captivante). Mais c'est bien sûr au moyen d'intrigues classiquement manichéennes et simplistes que l'acte de torture peut paraître efficace, et porteur d'une fin supérieure et bonne.

Ce tour de passe-passe bien comode rappelle le scénario imaginé

1. BORELLI Silvia. « Casting Light on the Legal Black Hole: International Law and Detentions abroad in the "War on Terror" ». *International Review of the Red Cross*, mars 2005, vol. 87, n° 857, pp. 39-68.

2. SCHLESINGER James R. (sous la dir. de). *Final Report of the Independent Panel to Review DoD Detention Operations*. Arlington, 2004, 126 p., site Internet www.defenselink.mil/news/Aug2004/d20040824finalreport.pdf.

par Stephen Hadley, conseiller pour la sécurité nationale de la Maison Blanche : « Que serait-il arrivé si le 7 septembre 2001, nous avions attrapé l'un des pirates de l'air et que, en nous fondant sur les informations obtenues grâce à cette arrestation, nous avions pensé que dans quatre jours, il y aurait une attaque dévastatrice contre les États-Unis ? » (*CNN*, 13 novembre 2005). Monsieur Hadley sait à l'évidence avec quoi l'on peut mettre Paris en bouteille.

Est-il besoin de rappeler que, l'usage de la gégène permit-il une fois sur mille de prévenir un acte terroriste, la torture rangera toujours le gentil aux côtés du méchant, en plus de multiplier assez naturel-

lement le nombre de méchants qui trouveront là de nouveaux motifs de détester le gentil ? Qu'inscrire en droit la torture comme moyen légal de garantir les fins et valeurs démocratiques serait évidemment auto-contradictoire ?

Signal faible ou tendance lourde, prenons garde en tout cas à ce que les pressions plus ou moins implicites pour modifier le DIH n'aient pas pour objectif de tester les réactions de l'opinion et de la communauté internationale, et d'élever, en l'absence de critiques suffisamment résolues, le seuil de tolérance à la transgression du DIH.

Benjamin Delannoy

ANALYSES CRITIQUES

BALANDIER Georges

Le Grand Dérangement

Paris : Presses universitaires de France, 2005, 119 p.

Georges Balandier est un anthropologue qui n'a cessé de s'intéresser au présent et à l'avenir. Dès le début de sa longue carrière, il a réagi contre ses aînés et ses contemporains passésistes, qui pensaient, en voyageant dans l'espace, remonter le temps en découvrant des sociétés « archaïques ». Figure de proue d'une anthropologie dynamique qui ne se laisse pas aisément séparer de la sociologie, il a très tôt attiré l'attention sur l'historicité des faits culturels et sociaux. À la fin des années 1950, en proposant (avec Alfred Sauvy et avec le succès que l'on sait) la formule « tiers-monde », il comparait la situation des pays colonisés accédant à l'indépendance politique, à celle du tiers-état avant la Révolution française. Nous avons donc affaire à un observateur attentif de la marche du monde et dans ce dernier livre, superbement écrit, c'est bien un état des lieux qu'il nous propose.

Il le place sous le signe du « grand dérangement », allusion aux exilés acadiens contraints à un nouveau commencement en Louisiane. Le grand dérangement actuel fait de tous nos contemporains des gens qui se découvrent en partie étrangers au

monde qu'ils sont pourtant eux-mêmes en train de façonner : un monde qui va trop vite et leur échappe chaque jour davantage. Conquérant, l'homme moderne a aujourd'hui créé des « nouveaux mondes », à partir des explorations du vivant, du travail de l'intelligence artificielle et des automates, de la mise en réseaux de la communication planétaire et des médiations virtuelles. Ces découvertes ont un tel impact sur les pratiques de la vie quotidienne qu'elles entraînent, à très grande échelle, une perte des repères.

L'auteur évoque à grands traits l'histoire du développement des incertitudes et des désenchantements, qui s'est produit après que les espérances nées de la révolution industrielle se sont éteintes dans les crises économiques, les guerres mondiales et les totalitarismes « sacrificiels ».

Les idéologues de la mondialisation la présentent aujourd'hui comme porteuse de civilisation, mais elle a surtout détruit les formes anciennes, généré de l'anomie, favorisé les abus de pouvoirs locaux et produit des millions de « dépossédés totaux ». La toute-puissance d'une économie de conquête, l'impuissance du politique

et la désaffection dont il souffre dans un monde fait de flux difficilement contrôlables, nous lancent de nouveaux défis. Un peu partout les manques sont dénoncés et les protestations s'organisent mais, si bruyantes soient-elles, elles se révèlent impuissantes à inverser les tendances.

La multiplication des privilèges de ceux qui contrôlent la « modernisation » a ses effets pervers : elle a ravivé une sorte de « théo-anti-impérialisme » violent qui utilise les armes de l'adversaire et les retourne contre lui. L'attentat du 11 septembre 2001 contre le World Trade Center a sans doute ruiné la croyance américaine en sa toute-puissance, mais il a aussi favorisé les politiques sécuritaires (extérieures et intérieures), sous la bannière d'un « christianisme durci », de telle sorte que les vieilles idées de chocs des cultures et des religions sont ressorties des placards. En l'espace de quelques décennies, la condition humaine a vu repousser toutes ses limites, mais elle n'en est pas pour autant à l'abri des

grands périls. Elle court des risques majeurs, parfois engendrés par ses propres créations et éprouve quelque peine à réaffirmer des identités devenues fluctuantes.

Dans un tel contexte, la prospective et la formulation de scénarios s'avèrent des exercices particulièrement difficiles. La crise du savoir (que l'auteur appelle la « méconnaissance experte ») résulte de la divergence entre les progrès inouïs des connaissances spécialisées et la méconnaissance de la dynamique globale engendrée par ces « mondes nouveaux ». Dans un espace-monde désormais largement indépendant des contraintes géographiques et des servitudes de la matérialité, les sciences humaines, selon Georges Balandier, doivent retrouver l'esprit d'audace du XVIII^e siècle : il faut rompre les cadres de la pensée ancienne pour commencer à comprendre une dynamique mondiale extraordinairement complexe.

Jean-Paul Colley

TELLIER Frédéric

L'Heure de l'Iran

Paris : Ellipses (coll. Mondes réels), 2005, 222 p.

Frédéric Tellier, ancien attaché culturel à l'ambassade de France en Iran, dans son ouvrage *L'Heure de l'Iran*, met en relief la situation paradoxale de l'Iran qui pourrait soit devenir la troisième cible des États-Unis (après l'Afghanistan et l'Irak), soit être appelé à jouer un rôle clef dans un Moyen-Orient déstabilisé et devenir de facto un « partenaire obligé » des États-Unis.

Les élections présidentielles du 24 juin 2005 ont amené à la présidence de la république l'ancien maire de Téhéran, Mahmoud Ahmadinejad, redonnant ainsi le pouvoir aux néo-conservateurs. Paradoxalement, la modernisation du pays a d'une part mis en évidence un éclatement des centres de pouvoir qui profite au « Guide suprême », et d'autre part institué un régime bicéphale figé.

La société civile iranienne critique le pouvoir théocratique issu de la révolution, au nom de la souveraineté populaire. La jeunesse iranienne, qui n'a connu ni la monarchie ni la Révolution islamique de 1979, participe à la culture mondiale et américanisée, tout en risquant les répressions des comités révolutionnaires. Cette situation accentue le glissement de la société iranienne hors des cadres islamiques. La rupture État / société civile s'accroît d'autant plus que la crise économique que traverse aujourd'hui l'Iran (dépendance extérieure et paupérisation) fait apparaître la société civile comme un véritable quatrième pouvoir.

Tout en ayant une ancestrale crainte pathologique de l'encerclement, l'Iran se retrouve confronté à de nombreux défis :

— Le dossier nucléaire : une grande partie de la population iranienne est favorable à l'acquisition de l'arme nucléaire par l'Iran (perçue comme une œuvre nationale, débutée sous le Chah, qui conditionne la puissance régionale du pays), tout en critiquant le régime. De son côté, la communauté internationale reste divisée sur ce sujet, notamment entre des États-Unis farouchement opposés à l'acquisition de l'arme nucléaire par l'Iran et l'Europe qui cherche une solution acceptable par tous. La Russie ne soutient pas les États-Unis quant à leur volonté de renvoyer le dossier iranien devant le Conseil de sécurité des Nations unies : la Russie considère notamment que l'Iran « comme tous les membres de l'accord de non-prolifération a droit à l'enrichissement de l'uranium ».

— La crise irakienne a été déclenchée par la coalition américano-britannique au moment où l'Iran

était à la fois affaibli au plan géopolitique et marginalisé quant à ses initiatives dans sa zone d'influence.

— En mer Caspienne, il semble que l'Iran ne tirera sans doute aucun profit tant que la situation de « désamour passionnel » entre l'Iran et les États-Unis perdurera.

— La relation avec les États-Unis : si les États-Unis et l'Iran n'ont toujours pas de relations diplomatiques, la population est pro-américaine alors que les autorités sont anti-américaines. Paradoxalement, tous les pays voisins sont alliés des États-Unis avec des populations plutôt hostiles aux États-Unis.

— Une opération militaire des États-Unis ou d'Israël contre l'Iran ne suffira pas à faire tomber le régime iranien. Face à un ennemi commun, le sentiment national, très fortement ancré dans la société iranienne, sera prédominant. Les Iraniens restent profondément attachés à l'indépendance nationale et à la fonction protectrice de l'État.

Au moment même où le régime iranien multiplie les signes de réconciliation ¹, c'est sur la scène interna-

1. Le président Mahmoud Ahmadinejad cherche à couvrir son échec à engager les réformes promises à l'électorat durant la campagne présidentielle (lutte contre la corruption, réduction des inégalités sociales, résorption du chômage...) et c'est sans doute la principale raison du durcissement du régime en politique intérieure et extérieure : les violents propos du président iranien contre l'État d'Israël qu'il appelle à « rayer de la carte » ; l'annonce de performances des missiles iraniens Shahab-3 dont la portée a été étendue à plus de 1 900 km, pouvant ainsi atteindre Israël ; la nature du programme nucléaire ; les ingérences iraniennes en Irak et en Arabie Saoudite (source : AZADEHKIAN Thiébaud, Centre national de la recherche scientifique, octobre 2005).

tionale que va se jouer l'avenir de l'Iran : un rapprochement avec les États-Unis permettrait alors d'abaisser le niveau de la menace militaire et améliorerait la situation économique désastreuse du pays (l'Iran qui est un géant pétrolier et gazier

conçoit le nucléaire comme un maillon essentiel de son indépendance énergétique ; dès lors, sans investissement étranger, l'Iran sera importateur net de pétrole d'ici 2010).

Viviane du Castel

DRANCOURT Michel

Les Nouvelles Frontières de l'entreprise

Paris : Presses universitaires de France, 2005, 266 p.

Il faut aimer l'entreprise : même si elle n'y figure pas telle quelle, cette phrase pourrait servir d'exergue ou de conclusion au dernier livre de Michel Drancourt. Un manuel, certes, avec sa construction rigoureuse, ses encadrés et ses repères bibliographiques, mais aussi beaucoup plus qu'un manuel : un voyage à travers l'espace et le temps, sous la conduite d'un « observateur engagé », doté de la double expérience de l'économiste et du praticien du management, et habile à passer de la réflexion distanciée à l'analyse très concrète des faits et des stratégies.

La marche vers la mondialisation sert en quelque sorte de fil conducteur aux trois parties qui composent l'ouvrage. Dans la première, l'auteur esquisse une histoire, depuis les temps les plus lointains, de ce qu'on peut déjà appeler l'entreprise — une organisation humaine tournée vers la production de biens et de services. On apprend ainsi, par exemple, le nom du premier promoteur immobilier connu (grâce à Plutarque), le Romain Crassus. On réalise surtout que, dès l'Antiquité, les transports façonnent l'économie et donnent naissance à une ébauche de division internationale du travail. L'Empire

romain a constitué un véritable « marché commun », auquel les invasions barbares mettent fin en détruisant le cadre juridique et en morcelant les territoires.

Mais la marche reprend au Moyen Âge, pour ne plus s'interrompre, avec la reconstitution des réseaux de transport (le plus souvent les anciennes voies romaines) et la reprise des échanges. Elle se poursuit à la Renaissance et s'accélère au XVIII^e siècle avec la découverte de nouveaux espaces, la constitution de véritables marchés nationaux et le progrès des techniques. Au XIX^e siècle, l'apparition d'entreprises de très grande taille — notamment dans les chemins de fer, dont les effectifs passent en France de 32 000 personnes en 1850 à plus de 300 000 en 1900 — favorise l'essor d'une gestion « moderne », appuyée sur des procédures précises et l'usage de la statistique. Cependant, jusqu'aux Trente Glorieuses qui suivent la Seconde Guerre mondiale, les territoires nationaux restent, pour l'essentiel, les espaces naturels des entreprises. Naissent et grandissent celles qui ont su déceler les nouveaux besoins des « sociétés de consommation » : le loisir (Club Méditerranée), le crédit (Cetelem),

le confort ménager (Moulinex), le soin de la personne (L'Oréal), pour se limiter à des exemples français, lumineusement analysés dans l'ouvrage.

La deuxième partie décrit le nouvel environnement de l'entreprise en ce début de XXI^e siècle où la mondialisation approche, pour ainsi dire, de sa forme « pure et parfaite ». Michel Drancourt identifie quatre ruptures : la mutation financière (prépondérance des marchés dans le financement des entreprises et, corrélativement, montée en puissance de l'actionnaire) ; la déréglementation (qui élargit le champ de la concurrence) ; la « mise en cause du quantitatif » (contestation du productivisme, dont le coup d'envoi fut donné en mai 1968) ; enfin l'« alerte énergétique ». Comme par le passé, le perfectionnement des communications modèle l'économie : la communication immatérielle avec Internet, mais aussi l'extraordinaire essor des transports. Chiffres et exemples à l'appui, l'auteur montre que, dans ce domaine, trois évolutions décisives ont conditionné l'avancée de la mondialisation : l'innovation technique, le progrès organisationnel (logistique) et la baisse des coûts grâce à la concurrence.

La troisième partie, enfin, nous fait voir la mondialisation « du point de vue de l'entreprise ». D'abord à travers l'examen de quelques stratégies (Nestlé, Danone, Siemens, McDonald's...), puis en passant en revue quelques grandes fonctions de l'entreprise, soumise aux nouveaux défis d'une économie mondialisée : finances, marketing, gestion du personnel, achats, etc. On voit notamment comment les marchés s'élargissent et évoluent, non seulement par l'expansion géographique et le jeu

des fusions-acquisitions, mais aussi par la diversification de l'offre — avec par exemple le développement des services associés aux produits. C'est ainsi que, chez IBM, les ventes de services n'ont cessé de croître, pour atteindre en 2003 près de la moitié du chiffre d'affaires (le géant américain a d'ailleurs vendu récemment sa division « ordinateurs personnels » au leader chinois de l'informatique).

De fait, la mondialisation modifie en profondeur la nature même de la grande entreprise. Nombre de firmes « globales » externalisent et morcellent leur production entre une multitude de fournisseurs et sous-traitants, cherchant à optimiser les coûts, la qualité et la réactivité au sein des réseaux ainsi constitués. Certaines, comme Cisco, deviennent des « nœuds de connexions » entre fournisseurs et clients. Du côté de l'actionariat, la mutation n'est pas moins profonde, avec l'élargissement de l'horizon des investisseurs et l'internationalisation du capital. D'où l'interrogation, de plus en plus fréquente, sur la nationalité de la grande entreprise. Parmi les entreprises hexagonales qui font partie du CAC40, 26 réalisent plus des deux tiers de leur chiffre d'affaires hors de France...

La mondialisation, prévoit l'auteur, va se poursuivre mais prendra d'autres formes : une croissance plus qualitative et respectueuse de l'environnement (ce qui suppose, entre autres, des méthodes consensuelles d'évaluation des « actifs naturels ») et une concertation internationale plus étroite pour répondre à un nombre croissant de défis planétaires, qu'il s'agisse du climat, de la pauvreté ou de la sécurité.

Ce livre, on le voit, sera précieux pour les étudiants, mais il séduira

aussi tous ceux qui veulent comprendre le fonctionnement de cette « boîte noire » qu'est l'entreprise, au-delà des mythes et des idéologies.

Ouvrez-le à n'importe quelle page, vous apprendrez sûrement quelque chose.

Gérard Moatti

MUCCHIELLI Laurent

Le Scandale des « tournantes ». Dérives médiatiques, contre-enquête sociologique

Paris : La Découverte, 2005, 124 p.

Entre 2001 et 2003, les viols collectifs baptisés « tournantes » deviennent une thématique récurrente dans les médias en France. Dans le débat public, ces actes, inexistantes auparavant, sont identifiés dans un espace urbain précis : la banlieue parisienne. Ils sont commis par une population ciblée : des jeunes de cités, d'origine maghrébine, qui cherchent à punir les mœurs libérales des jeunes filles de leur propre communauté.

L'ouvrage de Laurent Mucchielli contraste avec ces dérives médiatiques. Dans sa contre-enquête très détaillée et documentée, l'auteur situe d'abord le contexte intellectuel et politique, marqué par le développement d'une campagne électorale centrée sur l'insécurité. Il aborde à la fois le phénomène des viols collectifs dans son aspect historique, social et psychologique, et les mécanismes médiatiques de création de cette « actualité ».

Le parti pris du sociologue n'est ni de nier la question des violences spécifiques que les femmes subissent, ni d'affirmer que les viols collectifs n'existent pas. En revanche, il montre à travers des travaux réalisés par des historiens que la pratique de viols collectifs traverse toute l'histoire de sociétés urbaines, remontant même

à la fin du Moyen Âge (du XIII^e au XVI^e siècle). Au cours des années 1960, en France, la figure des bandes de « blousons noirs » fait l'objet d'une campagne médiatisée. Au cours de ces différentes périodes, les chercheurs se rejoignent sur le fait que ces actes ont fonction de rite initiatique et de reconnaissance virile au sein des groupes de jeunes garçons. Argument qui vient enrichir la contre-enquête afin de souligner qu'il ne s'agit pas d'une nouvelle pratique qui serait apparue de façon exceptionnelle en 2001.

Les statistiques que retrouve le sociologue confirment également que, si entre 1984 et 2002, le nombre de plaintes pour viols a été multiplié par trois, la qualification liée à des faits commis « en réunion » est restée stable. Pourtant, dans le débat public, la perception de l'augmentation de viols collectifs s'installe de façon univoque. Laurent Mucchielli indique trois éléments fondamentaux appropriés largement par la presse :

— Un film (*Le Squale*, 2000) qui se situe en banlieue parisienne et met en scène des adolescents pour la plupart d'origine immigrée. L'histoire démarre par une scène de viol collectif.

— Un an et demi plus tard, la très forte médiatisation d'un livre-

témoignage — L'Enfer des tournantes de Samira Bellil (Paris : Denoël, 2002). Le récit de vie de Samira Bellil est celui d'une jeune fille en conflit avec ses parents qui se laisse aller à la vie de « racaille » dans la cité. Pendant cette période, elle devient objet d'humiliations et de violences de la part d'une bande de jeunes. Elle situe son vécu comme une illustration du contexte des « quartiers sensibles », où la majorité des garçons issus de l'immigration sont marqués par un machisme culturel et un intégrisme religieux, dévalorisant complètement la place de la femme.

— Le mouvement « Ni putes ni soumises » viendra après prolonger cette image de la banlieue, avec ses victimes et responsables.

Ces trois événements médiatisés vont contribuer à la construction stigmatisée définie par l'équation

viol collectif = banlieues = jeunes d'origine immigrée = religion musulmane. La dimension géographique et ethnique prend toute la place. S'appuyant sur l'étude de dossiers judiciaires, le sociologue dénonce cet amalgame. D'une part, sur l'ensemble des violences sexuelles, la banlieue parisienne ne se trouve pas en tête ; d'autre part, parmi les spécificités des viols collectifs, il est admis que les auteurs peuvent avoir une personnalité fragile, perturbée, ou être dotés d'un cynisme de prédateur. Le rôle de rite de passage ou de vengeance personnelle relève la complexité du processus de tels actes. Processus très éloigné des représentations sociales incarnées par la plupart des personnes qui s'expriment dans le débat public (journalistes, hommes politiques, intervenants divers).

Lucia Ulanovsky

HUBER Peter W. / MILLS Mark P.

The Bottomless Well. The Twilight of Fuel, the Virtue of Waste, and Why We Will Never Run out of Energy

New York : Basic Books, 2005, 214 p.

L'éditeur nous indique, en page de couverture, que les auteurs ne font pas de quartier (writing in take-no-prisoners prose) ; il ne nous semble pas déplacé de les imiter en cela, car ce livre est un monument où la sottise le dispute à l'arrogance. Pourquoi dès lors lui consacrer une analyse plutôt qu'attendre qu'il ait disparu dans les poubelles de l'histoire ? C'est que, non seulement il est publié par une grande maison d'édition, mais qu'il émane du Manhattan Institute dont l'un de

ses auteurs est senior fellow. Le Manhattan Institute est un think-tank conservateur qui, sous la devise « mettre l'intellect au service de l'influence », indique que « les livres sont un élément central de sa démarche » et qu'il fait « tous les efforts pour que ses auteurs soient publiés par des éditeurs respectés ». L'influence de cet institut new-yorkais est considérable. Le maire de New York, Rudolph Giuliani, y a puisé l'inspiration de sa politique urbaine et George W. Bush l'a crédité pour la

conception de sa plate-forme électorale de « conservatisme compatissant » (compassionate conservative platform). Ce n'est pas ici le lieu de porter un jugement sur ces lignes politiques, mais il n'est pas déplacé de prendre une occasion de juger de la qualité de l'arbre à celle de ses fruits.

Le thème central du livre est l'énergie et les auteurs s'attachent à nous inculquer quelques vérités qu'il convient, selon eux, de substituer aux hérésies en cours :

— pourquoi la demande en énergie ne décroîtra jamais ;

— pourquoi la plupart des « gaspillages » d'énergie nous apportent en réalité des bénéfices ;

— pourquoi la source d'énergie est infinie.

Le programme, on le voit, est d'une ambitieuse prétention et se construit sur un domaine solidement structuré par la physique classique au début du siècle dernier.

Les auteurs prennent cependant la peine de nous prévenir que l'énergie est un concept « beaucoup plus subtil qu'on ne le croit communément hors des écoles d'ingénieurs et des départements de physique », et ils en appellent pour cela à l'autorité de Richard Feynman (prix Nobel de physique) qui fut mise à de meilleurs emplois. Un peu plus loin, ils nous préviennent que « les lois de la thermodynamique défient toute intuition ordinaire » et Feynman est de nouveau appelé à la rescousse pour affirmer que « l'ordre est un aspect très subtil de l'énergie ». Que n'a-t-on plutôt renvoyé le lecteur aux chapitres pertinents de ses célèbres Lectures on Physics où il expose avec une simplicité lumineuse les principes de conservation et de dégradation de

l'énergie. Les efforts confus pour définir la seconde loi de la thermodynamique nous informent que cette loi est « quantitativement rigoureuse », ce que l'on sait depuis plus d'un siècle, mais que « ses formulations quantitatives deviennent rapidement compliquées », ce qui est faux. Et l'on aboutit à cette conclusion surprenante qu'il n'y a pas de crise de l'énergie mais une crise de l'entropie. On voit aussi apparaître, au fil des pages, un concept de « pureté » de l'énergie qui n'appartient pas au langage de la physique mais qui semble occuper une place centrale dans la pensée des auteurs puisque, disent-ils, « l'usage principal que nous faisons de l'énergie [...] est de raffiner, traiter et purifier l'énergie elle-même ».

Sur ces fondements douteux se développe un sophisme dont l'essentiel tient en ceci : l'efficacité des systèmes qui utilisent l'énergie va croissant, ce qui est largement vrai, la consommation mondiale d'énergie croît également, ce qui l'est encore plus. Le sophisme consiste à affirmer que l'un est la cause de l'autre et surtout, par une vaste généralisation, que tous les efforts pour économiser l'énergie conduisent à accroître sa consommation. Et pourquoi cela ? Parce que, comme en conclut le chapitre intitulé « Demande insatiable », « nous sommes bâtis pour vouloir plus de ces choses, un plus sans limites ».

On arrive de là à ce qu'il fallait démontrer et au chapitre « Sauver la planète par le charbon, le pétrole et l'uranium », qui conclut sans ambages que « ce qui a déjà été réalisé en termes de transition vers le charbon, le pétrole et l'uranium est fantastiquement bon. On devrait le

célébrer comme le triomphe environnemental qu'il est. »

Reste évidemment la délicate question des réserves disponibles, et notamment des réserves fossiles, qui subsiste, même si l'on veut bien ignorer les atteintes à l'environnement planétaire dont seuls s'inquiètent futillement les écologistes. Elle est expédiée en quelques pages que couronne cette affirmation : « Les sources d'énergie sont, pour toutes fins utiles, infinies. »

Le style de ce « puits sans fond » (Bottomless Well) est celui de la prédication et, à l'occasion, celui de l'imprécation religieuse. Comme il convient, les prédicateurs invoquent les grandes figures du passé, Newcomen, Otto, Laval et surtout James Watt dont le nom revient aussi souvent que celui de Ford dans Le Meilleur des mondes d'Aldous Huxley. Quel dommage qu'on ne lui ait pas fait la grâce d'utiliser l'unité de puissance à laquelle il a donné son nom plutôt que les Quads¹,

relique des époques antérieures au système international d'unités. Il est vrai que le livre semble conçu pour un usage interne aux États-Unis où cette pratique archaïque subsiste.

Quant aux hérétiques, ils sont, comme il convient, affublés de sobriquets péjoratifs ; les « léthargistes » européens y côtoient les « cornuopiens » qui voudraient que l'État se mêle d'exercer de désastreuses fonctions régaliennes et naturellement les « verts ». Dans la dernière phrase du livre, Dieu sépare la lumière de l'ombre et le jour de la nuit ; après cela la messe est dite.

André Lebeau

1. Un Quad est un quadrillion (10¹⁵) d'unités thermiques britanniques d'énergie. Cette unité est la quantité de chaleur nécessaire pour élever d'un degré Fahrenheit la température d'une livre anglaise d'eau. Elle varie quelque peu selon la température à laquelle on fait cette opération.

LESTRANGE Cédric (de) / PAILLARD Christophe-Alexandre / ZELENKO Pierre

Géopolitique du pétrole

Paris : Technip, 2005, 259 p.

Issu d'un travail amorcé à l'École nationale d'administration, cet ouvrage synthétique a pour objectif de clarifier les enjeux géopolitiques du pétrole. Les trois auteurs y décryptent le nouveau « grand jeu » pétrolier dans un style très didactique, en mettant en valeur les défis majeurs — économiques, politiques et purement énergétiques du monde pétrolier.

Ainsi, l'ouvrage s'ouvre d'ailleurs sur une efficace clarification de ques-

tions clefs : jusqu'à quand, comment et à quel prix l'offre pétrolière permettra-t-elle de couvrir une demande croissante ? Va-t-on faire de nouvelles découvertes ? La technologie va-t-elle garantir un meilleur rendement de l'exploitation pétrolière ? Qui va pouvoir garantir la stabilité des marchés pétroliers à long terme ? Quelles seront les puissances qui auront la charge d'assurer la sécurité des sites de production et des voies d'approvisionnement d'ici 20 ans ? Quels se-

ront les États qui risquent de déstabiliser le monde du pétrole ? Quelle sera la place du dollar US sur les marchés pétroliers mondiaux ? Quels sont les arguments en faveur ou en défaveur d'une chute prochaine de l'offre pétrolière ? Où sont les risques géopolitiques émergents du monde du pétrole ? Quels sont les risques environnementaux soulevés par la consommation d'hydrocarbures ? Quel est l'état du transport maritime pétrolier ? Quelle place peut occuper la Chine ? Quelles sont les stratégies américaines ? etc.

Il remet également en cause un certain nombre d'idées reçues, dont ce domaine abonde : « la fin du pétrole est proche », « les États-Unis et l'Europe ne dépendent plus du pétrole du Moyen-Orient », « les consommateurs sont à la merci des producteurs », « la dépendance par rapport au pétrole est un mal nécessaire »...

Organisé selon un plan classique mais clair, le livre s'intéresse à de nombreuses facettes du sujet (panorama de l'offre et de la demande de pétrole, structures du marché pétrolier, qui est un marché très particulier au sein du commerce international, lien entre logique de « puissance » et pétrole, et enfin les « nouveaux mondes » du pétrole, qui est évidemment la partie la plus prospective de l'ouvrage.

Il s'achève sur un intéressant chapitre concernant « l'avenir incertain du pétrole », qui s'ouvre sur un nécessaire rappel de la situation actuelle : sans correspondre à la définition classique d'un « choc » pétrolier comme ceux des années 1970, la période actuelle a toutes les chances de rester dans l'histoire comme une transition de phase : la fin du pétrole

bon marché. Le livre souligne pour l'avenir trois enjeux :

— un enjeu politique de stabilisation des régions productrices et de réforme des relations producteurs / consommateurs ;

— un enjeu industriel et technologique dans l'ensemble de la filière pétrolière pour concilier questions environnementales et consommation accrue d'hydrocarbures (avec les questions entourant l'exploitation des hydrocarbures dits non conventionnels) ;

— et un enjeu de marché visant à limiter la variance brutale et spéculative du marché et donc du prix du pétrole.

Il met également en valeur, dans cette conclusion, deux incertitudes majeures — qui sont en fait deux scénarios de rupture du scénario conventionnel de l'Agence internationale de l'énergie, auquel les auteurs semblent finalement adhérer un peu trop d'un point de vue de prospectiviste — : l'une concernant une éventuelle rupture politique, en particulier touchant le Moyen-Orient, et l'alliance entre les États-Unis et l'Arabie Saoudite ; l'autre étant une rupture technico-économique liée à un « saut technologique, notamment dans le domaine des transports, de nature à permettre la substitution massive au pétrole d'autres sources d'énergie ». La dernière page du livre se réfère à « un scénario : le passage à l'après-pétrole », malheureusement de manière très succincte. On ne peut qu'espérer que la « suite » de ce livre permettra aux auteurs d'approfondir les pistes prospectives ouvertes par cette conclusion.

Geoffrey Delcroix

COMPTES RENDUS

CHANCEL Claude / PIELBERG Éric-Charles / TELLENNE Cédric
L'Autre Monde. Géopolitique de l'Asie méridionale et occidentale
Paris : Presses universitaires de France, 2005, 417 p.

« L'ancien conquérant [l'Occident] a réveillé son grand concurrent [l'Asie]. » Tel est le fil conducteur de ce livre-document (417 pages denses et illustrées). C'est un outil de travail pour comprendre les transformations qui sont en train de s'opérer dans l'ensemble asiatique. Il se divise en quatre grandes parties : des civilisations pérennes au rendez-vous de la modernité ; plusieurs voies pour un modèle asiatique ? ; l'Asie dans la nouvelle économie mondiale ; l'avenir du monde.

Les rappels historiques ont pour but de planter le décor : l'Inde « divisée et rebelle » ; la Chine matrice de l'Asie orientale ; le Japon « au bout du pays des hommes » comme dit Braudel ; la Corée plaque tournante de l'Asie du Nord-Est ; l'Asie du Sud-Est « angle de l'Asie », archipel posé sur l'eau. Cet ensemble existait bien avant l'Occident. « Un jeune pays vieux de cinq mille ans », affirme l'office national du tourisme coréen.

Le corps du livre est consacré aux « irrptions » qui ont marqué le réveil progressif de l'ensemble asiatique et surtout aux particularités de son étonnant développement : fin XIX^e siècle, le rôle de l'empereur et de l'oligarchie au Japon ; aujourd'hui, la voie socialiste de marché chinoise, les « petits pas » à l'indienne qui s'accélèrent, sans oublier les « dragons » et les « tigres » qui préfigurent l'aventure chinoise en cours. La quatrième partie décrit les risques de tensions et de conflits internes à l'Asie et se termine sur le thème de l'Asie, aubaine mais aussi menace sur l'économie mondiale.

Ce résumé ne rend pas compte de l'abondance des faits et chiffres relatifs aux régions considérées, ni des analyses culturelles qui permettent de les mieux comprendre alors qu'elles font la richesse de cet ouvrage d'agrégés d'histoire, bons connaisseurs de l'Asie et de l'évolution de l'économie mondiale.

Michel Drancourt

CNUCED (Conférence des Nations unies sur le commerce et le développement)
Transnational Corporations and the Internationalization of R&D. World Investment Report 2005
Genève : CNUCED, Nations unies, 2005, 333 p.

Après trois années de baisse, l'investissement étranger direct (IED) s'est redressé en 2004. Les raisons invoquées pour expliquer cette reprise sont l'intensification de la concurrence

dans le domaine industriel, la hausse du prix des matières premières et la reprise des fusions-acquisitions internationales. Si la croissance économique se confirme, les auteurs estiment que cette reprise des IED devrait se poursuivre. La zone la plus active est la région « Asie-Océanie » qui est à la fois le premier destinataire et la principale source des IED. La Chine, qui bénéficie notamment de la très forte attractivité de Hong Kong, reste, et de loin, le premier pays d'accueil, mais les investissements à destination de l'Inde sont aussi en forte croissance. Les investissements dans les pays riches en matières premières ont connu une forte hausse qui bénéficie entre autres à la Russie et aux pays de la Communauté des États indépendants.

En volume, les entrées d'IED représentaient 648 milliards de dollars US en 2004 et atteignaient 233 milliards dans les pays en développement. Elles sont donc plus de deux fois supérieures à l'aide publique au développement mais, concentrées dans une poignée de pays, elles ne sauraient s'y substituer. Une large partie des pays les moins avancés n'en bénéficie pas. Une part croissante de ces investissements, y compris dans les pays en développement, est consacrée à la recherche et développement (R&D). Ce phénomène n'est pas nouveau puisque les sociétés transnationales ont toujours dû adapter leurs technologies aux pays dans lesquels elles désiraient vendre, ce qui nécessitait une certaine internationalisation de la recherche, mais on note aujourd'hui une croissance nette des investissements en R&D destinés aux pays en développement consacrés aux recherches innovantes. Les auteurs du rapport pensent que la nouvelle direction que prennent les IED peut fortement contribuer au processus de développement, dont l'innovation est un des moteurs, si tant est que les transnationales aient des relations avec les entreprises du pays et avec les institutions. Bien entendu, la situation locale reste déterminante.

François de Jouvenel

FRIEDMANN John

China's Urban Transition

Minneapolis : University of Minnesota Press, 2005, 200 p.

John Friedmann est professeur émérite à l'université de Californie (School of Public Policy and Social Research). La Chine achève sa transition démographique. La Chine est engagée dans un processus de transition d'une économie dirigée vers une économie de marché. Autre transition à l'œuvre depuis une vingtaine d'années, celle d'une société rurale vers une société urbaine. Si la ville chinoise a plus de 5 000 ans d'histoire, ce n'est que dans le dernier quart du XX^e siècle que le phénomène de l'urbanisation a émergé comme un facteur de profondes transformations sociales. Chaque année en Chine, quelque 10 millions de paysans quittent la campagne pour la grande ville. L'ampleur de l'émigration rurale, alors même que le mouvement doit encore s'amplifier, a eu de profondes répercussions, conduisant à une révolution au plan culturel, politique et économique.

John Friedmann livre, dans cet ouvrage, une étude dont l'originalité est de procéder par un « traitement intégré » de tous les processus engagés par le phénomène d'urbanisation, et à tous les niveaux : politiques régionales, émergence des industries rurales, flux migratoires, extension de la sphère des prérogatives individuelles... La perspective historique est donnée dès le début de l'ouvrage. Si les politiques destinées à réguler cette marée humaine en mouvement sont évidemment analysées, l'auteur insiste également sur la dimension du quotidien, sur la manière dont le processus d'urbanisation se poursuit lorsque le migrant revient dans son village natal, véhiculant de nouvelles représentations. Retrouvant la perspective historique, John Friedmann s'interroge enfin sur la possibilité d'une urbanisation durable (*sustainable urban development*), en la reliant au passé, aux valeurs et aux institutions de la Chine.

Yann Vinh