

L'énergie où va-t-on ?



BERNARD TAMAIN
Professeur,
École nationale supérieure
d'Ingénieurs (ENSI), Caen

L'énergie sera un problème majeur demain pour l'humanité. L'épuisement des énergies fossiles, les limites des ressources en énergies renouvelables, les questions de pollution, déchets, effet de serre, coût, intermittence, les contraintes géopolitiques, l'acceptabilité par le public seront autant de contraintes. Aucune source d'énergie n'est idéale et il faudra additionner au mieux toutes les solutions. Parmi les énergies renouvelables, l'énergie solaire qui est la seule qui soit abondante sera précieuse. Les énergies nucléaires de nouvelle génération, parce qu'elles seront abondantes, sans effet de serre et continues joueront un rôle croissant au niveau mondial.

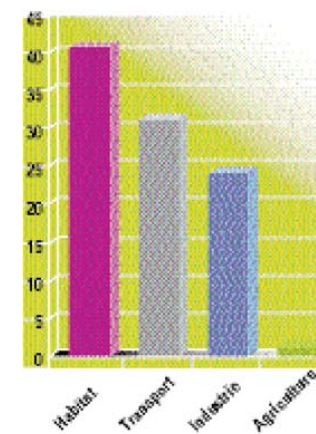


FIGURE 1
Postes principaux de consommation d'énergie finale en France (en pourcentage); l'énergie finale est l'énergie payée par le consommateur, ce qui inclut son transport et sa transformation (raffinage du pétrole, production de l'électricité).
http://www.recherche.gouv.fr/mstp/energie_mstp_200401.pdf

L'énergie est indispensable dans tous les compartiments de notre vie : nourriture, chauffage des habitations, transports, alimentation des équipements, santé, industrie. Chaque année, les besoins en énergies ne cessent de croître en particulier avec l'explosion de la demande chinoise et le développement de l'Inde. Le pétrole, qui est l'une des formes d'énergie les plus employées aujourd'hui, est appelé à s'épuiser. Si l'on ajoute le problème du réchauffement climatique dû à une trop grande consommation des énergies fossiles, de nombreuses questions viennent à l'esprit : compte tenu des réserves de pétrole, combien de temps pourra-t-on tenir à ce rythme ? Peut-on le remplacer par une autre source d'énergie ? Peut-on enrayer le réchauffement climatique ? Y a-t-il des formes d'énergie plus respectueuses de l'environnement ?

Bien sûr une question clé est aussi celle de notre consommation, car, après tout, le problème serait moins épineux si l'on réduisait nos besoins en énergie. Est-ce possible d'atteindre ce but ?

Peut-on réduire notre consommation énergétique ?

Cette question peut être abordée à deux niveaux : au niveau mondial et à celui des pays développés comme la France. Il est clair que, compte tenu de l'éveil de la Chine et de l'Inde (et plus tard, espérons-le, celui de l'Afrique), il ne peut y avoir qu'une augmentation de la consommation mondiale ; une estimation moyenne prévoit un doublement

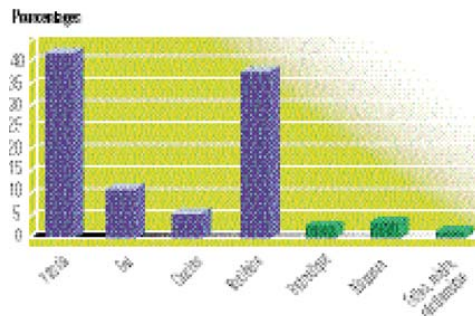
des besoins en énergies sur les cinquante prochaines années. Dans les pays développés comme la France, on pourrait en revanche éviter le gaspillage en diminuant l'ampleur de nos besoins. Mais regardons de plus près.

La figure 1 indique que les postes principaux de consommation énergétique dans notre pays sont l'habitat (résidentiel et tertiaire) d'une part, les transports d'autre part.

Diminuer notre consommation passe d'abord par réduire ces deux postes principaux. Or, sur les trente dernières années, le poste « habitat » a augmenté de 21 % et celui des transports de 92 %. Il va être difficile d'inverser la tendance.

Diminuer les dépenses énergétiques de l'habitat impliquerait d'abord de réduire les dépenses de chauffage qui constituent la plus grande part de ce poste. L'isolation des habitations est une priorité qui ne peut s'affirmer que lentement car, même si l'on décide un

FIGURE 2
Répartition de la consommation en énergie primaire en France :
 en bleu, les énergies non renouvelables et en vert les énergies renouvelables.
 Les premières assurent plus de 90 % de la consommation.
 Les contributions de l'éolien, du solaire et du géothermique sont très faibles. Elles sont un peu plus fortes dans d'autres pays mais elles y restent limitées.



effort déterminant sur les constructions neuves, l'amélioration du parc immobilier plus ancien sera longue. Et ne voit-on pas plutôt une augmentation de nos dépenses liées au confort thermique puisque la tendance actuelle est le développement de la climatisation qui consomme tout autant que le chauffage ?

Quant aux transports, 57 % des dépenses sont celles des particuliers. Cette explosion des dépenses est liée d'abord au mode de vie des Français qui souhaitent habiter à la campagne, donc loin des villes qui concentrent les lieux de travail. Il faudrait mettre les villes à la campagne... ou développer massivement les transports en commun. Il faudrait aussi renoncer à des vacances lointaines... En revanche, au niveau du transport des marchandises, une meilleure organisation et un développement du ferroutage sont des enjeux majeurs.

Au total, on comprend qu'il sera difficile de diminuer les besoins de nos concitoyens de pays développés. Il faudrait une prise de conscience forte et une modification majeure de nos modes de vie pour inverser la tendance. Ce sera déjà bien si notre consommation n'augmente plus...

L'énergie, d'où vient-elle ?

L'énergie ne se crée pas, on ne peut que la transformer. On transforme une énergie primaire en énergie utile, à savoir par exemple :

- du pétrole en chaleur (chaudière) ou en mouvement (dans une automobile) ;
- du pétrole, du gaz ou de l'uranium en chaleur puis en électricité dans les centrales électriques ;
- du vent en électricité avec les éoliennes ;
- de l'énergie solaire en chaleur (capteurs thermiques ou pompe à chaleur) ou en électricité (cellules photovoltaïques).

Une énergie intermédiaire comme l'électricité est appelée un vecteur énergétique. Un vecteur énergétique est d'autant plus prisé qu'il est facile à transporter (comme l'électricité) ou à stocker (comme l'essence). On mesure souvent toutes les énergies avec une unité qui est la tonne équivalent pétrole que l'on note tep⁽¹⁾. On utilise aussi le kWh⁽²⁾, surtout pour l'électricité.

La consommation mondiale actuelle d'énergie primaire est de 10 milliards de tep par an, ce qui veut dire que chaque habitant consomme chaque année 1,7 tep, avec bien sûr de grosses disparités entre les Africains et les Américains...

(1) La tep est une unité utile au niveau de la consommation globale car elle est un bon ordre de grandeur de la consommation mondiale individuelle par an qui s'élève à 1,7 tep. Un Français consomme 4,2 tep par an.

(2) Le kWh est l'unité utilisée sur nos factures d'électricité et même de gaz aujourd'hui. C'est l'énergie dépensée en une heure par un appareil ayant une puissance de un kilowatt.

Les énergies primaires utilisées sont renouvelables ou non

Aujourd'hui, les énergies non renouvelables assurent plus de 90 % des besoins mondiaux. L'histogramme ci-contre (fig. 2) fournit quelques données pour la France. Les énergies non renouvelables sont tirées des minerais ou des puits (charbon, pétrole, gaz, uranium) : des paniers sont remplis et se vident inexorablement : dans combien de temps seront-ils vides ?...

Les énergies renouvelables concernent l'hydraulique, la biomasse, l'éolien, le solaire, le géothermique, les déchets et l'énergie des mers : l'énergie « coule » de façon continue, mais le débit du robinet est-il suffisant pour palier à l'épuisement des énergies non renouvelables ?

La réponse à ces questions est aujourd'hui connue : on sait que le pétrole manquera dans quelques dizaines d'années. Oh, bien sûr, on ira chercher du pétrole de plus en plus loin, avec des moyens techniques de plus en plus sophistiqués, et un coût de plus en plus élevé, mais un jour il manquera... Le gaz aussi d'ailleurs. Le charbon restera abondant pendant quelques siècles. Il a été abandonné il y a quelques décennies car il était non rentable et polluant. Il sera dans 50 ans le seul combustible fossile abondant et la question de son exploitation est donc posée. L'uranium du panier lui aussi va s'épuiser si les centrales nucléaires restent celles d'aujourd'hui car le combustible n'est actuellement utilisé qu'à moins de 1 % de ses possibilités énergétiques. Si l'on veut disposer d'un nucléaire durable, il faudra changer totalement le mode d'exploitation de l'uranium (voire du thorium) en concevant et en exploitant de nouveaux réacteurs nucléaires. Bien sûr la fusion thermonucléaire, si elle était un jour réussie (se reporter à l'encadré *Le projet ITER*) changerait totalement la donne, mais, au mieux, ce ne sera guère avant la fin du siècle.

Se posent bien évidemment les questions

Le projet International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

Le but est de réaliser en réacteur la fusion qui s'opère dans une étoile comme le Soleil, pour disposer d'une source d'énergie abondante et produisant peu de déchets. Le combustible prévu à terme est le deutérium, et dans un premier temps un mélange deutérium-tritium. La difficulté technique est de le maintenir à très haute température (150 millions de degrés) et confiné pendant plusieurs secondes afin que les réactions de fusion puissent se produire en quantité suffisante.

Les résultats encourageants obtenus dans le réacteur Tore Supra ont conduit à la mise en œuvre de ce projet international à Cadarache. Le réacteur ITER aura une puissance de 500 MW, et consommera 100 kg de deutérium par an, et 150 kg de tritium obtenus à partir de 300 kg de lithium.

Le deutérium est très abondant : 33g/m³ d'eau de mer.

Le tritium est produit à partir du lithium dont les ressources dans l'écorce terrestre sont estimées à 2 000 ans, mais cette limite peut être repoussée à des millions d'années si on peut l'extraire de l'eau de mer.

des problèmes environnementaux liés au charbon et au nucléaire : le charbon pollue et est un acteur majeur de l'effet de serre... et le nucléaire se heurte à la question de la sûreté et des déchets. Dans ces conditions, les énergies renouvelables peuvent-elles prendre le relais ?

La réponse est clairement négative dans la plupart des cas. L'énergie hydraulique (actuellement la plus développée) sera vite saturée (les capacités de production sont

presque toutes utilisées en France, même la petite hydraulique⁽³⁾. L'éolien fournira au maximum 12 % environ de l'énergie nécessaire même si on équipe tous les sites disponibles sur terre et sur les côtes françaises⁽⁴⁾. La biomasse elle aussi ne pourra fournir plus de 12 % des besoins totaux, tout simplement parce que les surfaces disponibles sont limitées et qu'il faut bien garder des surfaces pour l'alimentation et le bétail. Le géothermique est négligeable sauf sur quelques sites privilégiés. Seul le solaire est abondant et peut théoriquement satisfaire les besoins à condition de couvrir 3 % du territoire français de capteurs dédiés, et ce, à un coup actuellement prohibitif.

Quelles contributions des énergies renouvelables ?

Devant de telles données la seule attitude raisonnable est de développer en parallèle les diverses formes de production d'énergie. Et bien sûr, il faut commencer par les sources renouvelables en préservant au maximum l'environnement.

L'hydraulique

C'est actuellement la production d'énergie renouvelable la plus répandue dans les pays développés. Cette énergie présente de nombreux avantages : elle est relativement abondante, et suffisamment versatile pour permettre d'adapter facilement son réseau aux pointes de production. Un simple barrage constitue en fait un excellent moyen de stock

age de l'énergie. En effet, lorsque le réseau ne peut absorber l'excédent d'électricité produit par une source nucléaire ou thermique, il existe des systèmes réversibles pompes/turbines : en heures creuses, on pompe de l'eau d'un bassin bas vers un bassin haut, et, en période de pointe, le mouvement est inversé, l'eau est turbinée pour produire de l'électricité. Malheureusement pour l'avenir, l'exploitation de l'énergie hydraulique est à peu près saturée dans les pays développés et certains projets très ambitieux dans les pays en voie de développement posent des problèmes écologiques et sociologiques (déplacement de populations) qui sont majeurs. En France, il sera difficile de dépasser 15 % d'électricité d'origine hydroélectrique même en utilisant la petite hydraulique.

L'éolien

Son développement ne pose pas de problème technique ou écologique majeur. Son coût n'est pas insupportable. Il ne faut cependant pas croire qu'il est parfait : comme évoqué ci-dessus, il est d'abord limité au niveau de sa capacité maximale de production : même l'Allemagne (qui a la capacité éolienne la plus forte du monde) ne produit que 5 % d'électricité d'origine éolienne. L'éolien pose aussi le problème majeur de l'intermittence : que faire quand il n'y a pas de vent ? Il faut qu'un autre mode de production flexible prenne le relais. Le solaire, lui aussi intermittent, n'est pas adéquat en tant que source relais. Actuellement, les pays qui ont misé sur l'éolien (c'est le cas du Danemark, de l'Allemagne et de l'Espagne) utilisent des centrales thermiques classiques (au gaz, au fuel ou au charbon) car elles sont versatiles. C'est la raison pour laquelle l'Allemagne et le Danemark restent de forts émetteurs de gaz à effet de serre. Il est nécessaire, pour poursuivre dans cette voie, d'apprendre à maîtriser la pollution libérée par les centrales thermiques.

(3) Installations dont la capacité est égale ou inférieure en France à 12 MW

(4) Il faut bien à ce niveau réaliser quels sont les ordres de grandeur : une grosse éolienne a une puissance nominale de quelques MW. Mais comme le vent est intermittent et que le rendement n'est bon qu'avec un vent de force 7, la puissance effective n'est que le quart de la puissance nominale. Il faut donc plusieurs milliers de grosses éoliennes pour produire autant d'électricité qu'un seul réacteur nucléaire.

La biomasse

La biomasse est très utile pour palier au problème des carburants de remplacement de l'essence et du fuel. Mais attention : ne brûlez pas dans votre moteur de l'huile de friture usagée, comme certains médias le montrent parfois ! Ce procédé est catastrophique d'un point de vue écologique car il disperse dans l'environnement de nombreuses molécules cancérigènes ! Fort heureusement, les quantités disponibles d'huile de friture sont assez limitées pour que le problème le soit aussi !

D'une façon générale, la biomasse ne pourra pas remplacer tout le pétrole utilisé dans nos véhicules : il faudrait une superficie 10 fois plus grande que la France pour répondre à la consommation française seule ! Une difficulté majeure réside dans la transformation des matières premières : le bilan énergétique total doit prendre en compte l'énergie nécessaire pour produire une tonne équivalent pétrole d'éthanol ou d'huile (engrais, récolte et obtention du carburant liquide final). L'éthanol de blé présente un rendement énergétique ridicule. C'est mieux pour la betterave ou l'huile de colza mais cette contrainte énergétique est très forte. Il est important pour l'avenir d'essayer de valoriser non seulement les graines mais aussi la matière ligneuse⁽⁵⁾. Un autre enjeu de recherche relève du génie génétique.

Le géothermique

Le géothermique utilise la chaleur retenue dans les profondeurs de la terre, chaleur principalement dégagée par la radioactivité naturelle. Cette énergie reste faible au regard de l'énergie solaire : 0,06 W/m² pour la géo-

thermie contre 200 W/m² pour l'énergie solaire en moyenne. On comprend donc que l'énergie géothermique ne peut être exploitée que dans quelques sites sur lesquelles elle est naturellement concentrée. Le procédé consiste à injecter une eau froide que l'on récupère après chauffage dans les profondeurs de la terre mais la corrosion des tuyauteries utilisées reste un des problèmes majeurs.

Le solaire

C'est de très loin la source d'énergie renouvelable la plus abondante. Il est facile de comprendre cette affirmation si l'on note que toutes les énergies renouvelables (ou presque) sont en fait dérivées de l'énergie solaire. Le tableau page suivante donne les pourcentages d'énergie solaire que l'on retrouve dans le vent, l'hydraulique, la biomasse et les vagues. Ces pourcentages sont faibles ce qui veut dire que seulement une petite partie de l'énergie primaire du Soleil se retrouve dans toutes les autres formes d'énergie renouvelables ; seul le géothermique, dû pour une majeure partie à la radioactivité naturelle, et les marées (dues à l'attraction de la Lune) échappent à la domination du Soleil ! On peut d'ailleurs s'étonner au vu du tableau que l'énergie hydraulique, qui ne représente qu'une partie faible de l'énergie solaire initiale soit pourtant rentable. La raison en est que la nature a eu la gentillesse de concentrer l'énergie correspondante dans des lacs qui reçoivent les eaux de ruissellement de bassins de très grandes surfaces. Oui, les énergies renouvelables ont toutes l'inconvénient d'être dispersées, sauf l'hydraulique et dans une mesure bien moindre l'éolien dans les zones ventées ou le géothermique dans les zones volcaniques. Il tombe en moyenne 200 W/m² d'énergie solaire au niveau du sol français avec bien sûr des variations fortes entre le jour et la nuit, l'été et l'hiver. Une première difficulté est que les besoins énergétiques sont supérieurs quand l'énergie solaire est la moins abon-

(5) Arbres, taillis, buissons, résidus forestiers et agricoles (branches, racines, cimes, pailles), déchets dus à l'industrie du bois (copeaux, sciure...), matériaux de récupération (caisses, palettes, bois issu de démolitions ou de construction).

Pourcentages d'énergie solaire convertis en énergies renouvelables comme le vent, la biomasse,... Puissances correspondantes au mètre carré comparées aux puissances associées à d'autres formes d'énergie.

Forme d'énergie renouvelable	Origine	Pourcentage rapporté au solaire	Puissance moyenne (Watt/m ²)
Éolien	Solaire	10 ⁻⁴ à 10 ⁻³	0,02-2
Hydroélectrique	Solaire	3 · 10 ⁻⁴	0,05
Biomasse	Solaire	1 à 3 %	2-6
Énergie éolienne	Vent, donc solaire et gravitation	1 à 3 · 10 ⁻⁴	0,5*
Marées	Gravitation		0,2*
Solaire	Solaire		200
Geothermique	Radioactivité naturelle et gravitation		0,06

* Pour la France, rapporté à la surface de la France.

dante... Ce problème serait moindre si l'on savait stocker massivement l'énergie (en particulier l'électricité), mais ce n'est pas le cas. On retrouve ici un problème similaire à celui de l'éolien.

On peut utiliser l'énergie solaire de deux façons : soit en chauffant un fluide caloporteur utilisé ensuite pour préchauffer de l'eau domestique ; soit en transformant l'énergie solaire en électricité dans un capteur photovoltaïque. La première méthode ne pose aucun problème de principe et devrait être utilisée massivement pour chauffer les habitations et délivrer de l'eau chaude sanitaire : 1,5 m² de capteurs suffit pour fournir en moyenne 60 % de l'eau chaude sanitaire pour une personne. Le complément doit être assuré par une autre source comme l'électricité. Il est essentiel d'utiliser au maximum cette énergie solaire thermique pour réduire dans l'avenir la contribution des énergies non renouvelables. Il n'y a aucun verrou technologique mais seulement un coût d'installation

plus élevé (mais vite récupéré) et une nécessité d'un savoir-faire de la profession.

La situation est aujourd'hui beaucoup plus compliquée pour la production d'électricité d'origine solaire avec des capteurs photovoltaïques. Ils sont actuellement à base de silicium et leur production massive pose des problèmes sérieux de déchets industriels. Si l'on veut stocker l'électricité produite, les batteries efficaces sont à base de plomb et leur démantèlement (au bout d'une dizaine d'années) pose aussi des problèmes d'ordre écologique. Contrairement à ce qui est généralement cru, les capteurs photovoltaïques actuels ne sont donc pas exempts de problèmes et les capacités réelles de production (compte tenu des rendements) sont moins réelles que les chiffres bruts peuvent le laisser penser. C'est ainsi que l'« opération 100 000 toits » par laquelle 100 000 toits allemands vont être couverts de capteurs photovoltaïques ne produira que le cinquième de l'électricité d'un seul réacteur nucléaire

(il y en a 18 en Allemagne et 59 en France). Si l'on ajoute que le coût de l'électricité photovoltaïque est très élevée (environ 10 fois le coût de l'électricité produite par les moyens classiques), on comprend pourquoi le solaire photovoltaïque ne peut se développer que s'il est massivement subventionné. Enfin, il faut bien sûr là aussi faire des bilans strictement énergétiques : l'énergie dépensée pour construire un capteur photovoltaïque n'est récupérée qu'après environ six années de fonctionnement. Tous ces éléments plaident en faveur d'une recherche de nouveaux capteurs moins onéreux et moins gourmands en énergie pour leur mise en œuvre, mais aussi moins polluants à la fabrication. Les recherches sur les semi-conducteurs organiques pourraient proposer des améliorations dans ces directions.

Les déchets

Ils doivent eux aussi contribuer au bouquet énergétique du futur mais, là aussi, les ordres de grandeur montrent que leur contribution se limitera à seulement 1 ou 2 % des besoins. Ils ne contribueront donc que faiblement aux problèmes énergétiques de demain.

L'énergie des mers

Cette catégorie recouvre en fait plusieurs sortes d'énergies.

Il y a d'abord l'énergie des marées. L'usine de la Rance a été une usine d'avant-garde et elle a montré les limites de la méthode : problèmes de corrosion, d'ensablement, de coquillages...

Des solutions sont actuellement mises en œuvre pour récupérer l'énergie des vagues ou celle des courants. L'énergie des vagues se heurte aux dégâts qu'occasionnent les

tempêtes : il faut trouver des installations qui s'adaptent à ces situations extrêmes ; l'énergie des courants est plus régulière mais pose des problèmes de circulation des navires et d'entretien des installations.

On peut enfin tenter de récupérer l'énergie thermique des mers chaudes en notant que la température en surface des mers inter-tropicales dépasse de 20 °C la température à 1 000 mètres de profondeur. À nouveau, le problème posé est ici celui d'installations pouvant supporter des tempêtes, mais aussi celui de l'énergie nécessaire pour pomper l'eau froide profonde vers la surface. Des projets pour récupérer ces diverses formes d'énergie des mers existent cependant mais leur contribution au bouquet énergétique restera inférieure à celle des installations hydrauliques classiques.

Au total, on est malheureusement confronté au fait que les énergies renouvelables hors solaire sont insuffisantes pour contribuer à l'essentiel de nos besoins. Tant que l'énergie solaire ne pourra pas être massivement utilisée, on devra donc avoir recours à ce qui nous restera d'énergies non renouvelables. On a vu plus haut que, parmi elles, le charbon et le nucléaire seront les plus abondantes. Encore faut-il résoudre les problèmes liés à leur exploitation...

Vers une utilisation optimale des énergies non renouvelables

Les énergies non renouvelables de demain seront le charbon et le nucléaire. Le pétrole se fera en effet rare et on peut espérer que ce précieux produit sera surtout sauvegardé pour la

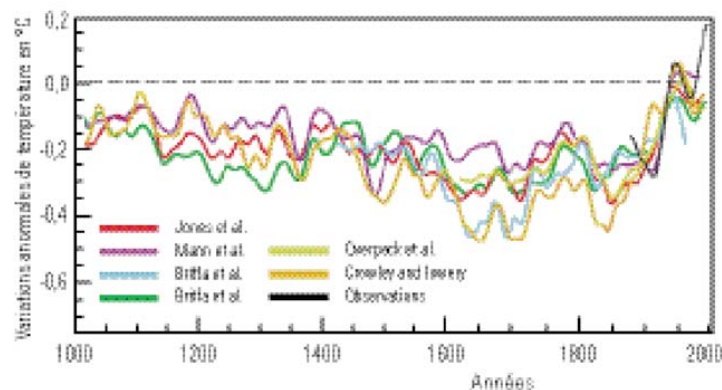


FIGURE 3
Évolution de la température moyenne de l'hémisphère nord sur le dernier millénaire.
 Les différentes courbes correspondent à des mesures directes ou indirectes. Elles permettent d'observer qu'il existe des fluctuations sur des périodes de quelques dizaines d'années. Les variations observées sur la fin du XX^e siècle excèdent largement ces fluctuations et les incertitudes méthodologiques. D'après P. Jones : <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/info/miltemp/>.

chimie. Quant au gaz, l'accroissement prévisible de son utilisation dans les 30 ans qui viennent conduira ensuite à une pénurie.

Le cas du charbon

On ne peut pas aborder le cas du charbon sans prendre en compte l'effet de serre qu'il induit. Notons d'abord que, contrairement à ce que certains politiques ou pseudo-scientifiques laissent croire, le réchauffement climatique est aujourd'hui un fait établi. L'évolution de la température de l'hémisphère nord sur 1 000 ans (fig. 3) permet de vérifier que le réchauffement récent dépasse largement les fluctuations habituelles observées sur des périodes courtes. Les seules incertitudes portent sur son ampleur future et sur l'ampleur de ses conséquences, mais on sait déjà que la situation sera grave. En tenir compte dans les décisions d'ordre énergétique relève donc de l'évidence.

Le charbon ne sera bien sûr pas le seul responsable puisque tout ce qui brûle y contribue, mais son abondance en fera l'acteur majeur du réchauffement climatique. Par ailleurs, pour une quantité donnée d'énergie produite, le charbon génère plus de gaz carbonique (gaz à effet de serre) que le pétrole ou le gaz. Il sera donc absolument nécessaire de capturer et de séquestrer le gaz carbonique libéré par sa combustion. La Communauté européenne a financé une installation pilote

au Danemark mais on est encore loin du dimensionnement industriel nécessaire. Les conséquences ne seront pas négligeables au niveau des coûts énergétiques et il est donc important que les coûts de facturation des émissions de gaz à effet de serre dépassent nettement les 30 € la tonne afin d'inciter au développement systématique de la séquestration. Il est en particulier essentiel que les récents projets de développer dans la Nièvre une production d'électricité à partir de charbon soient, dès la conception, réfléchis en intégrant cette contrainte incontournable. Gérer la séquestration du gaz carbonique est un enjeu majeur pour l'humanité ; c'est aussi un enjeu industriel évident car ceux qui maîtriseront la technologie pourront l'exporter.

Le cas du nucléaire

Une autre conséquence de l'effet de serre est qu'il deviendra urgent de limiter l'usage des carburants traditionnels dans les transports. Produire de l'essence à partir du charbon est donc une très mauvaise idée. La question des transports sera abordée dans la suite de cet article.

À côté d'une utilisation importante du charbon, il sera nécessaire de faire appel à un nucléaire durable, c'est-à-dire ne conduisant pas à un épuisement rapide des combustibles (uranium et thorium) et ne posant pas de problèmes majeurs de déchets. Les réacteurs actuels utilisent pour l'essentiel la fission de l'isotope 235 de l'uranium, isotope qui représente moins de 1 % du minerai.

Au rythme actuel de notre consommation, nous ne disposons de ce combustible que pour environ un siècle. Il sera nécessaire de construire des réacteurs à neutrons rapides permettant de brûler l'isotope 238 qui constitue l'essentiel du minerai.

On peut aussi envisager des réacteurs utilisant le thorium encore plus abondant que l'uranium. Le développement de telles filières permettra d'assurer une production nucléaire sur des périodes s'exprimant en millénaires. Les réacteurs correspondants sont dits de génération IV. Six solutions ont été proposées au niveau mondial ; elles sont actuellement étudiées par un groupe d'une dizaine de pays.

Les enjeux sont une production suffisante d'énergie, avec une sûreté de haut niveau et une production limitée de déchets, la chaudière nucléaire fonctionnant à haute température afin d'améliorer les rendements thermodynamiques. Compte tenu des verrous technologiques à lever, il est inconcevable que ces réacteurs soient déployés industriellement avant une trentaine d'années. Dans l'intervalle, les réacteurs de génération III (l'EPR est de ce type) prendront le relais des réacteurs actuels, les PWR.

Pour le futur, les questions de sûreté et de traitement des déchets restent bien sûr un problème majeur. La sûreté sera traitée en multipliant les protections autour du combustible afin d'éviter une dissémination de la radioactivité même en cas d'accident. Quant aux déchets, deux pistes seront développées : celle d'une moindre production (en particulier en utilisant le thorium comme combustible) et celle de la destruction (transmutation) des plus problématiques d'entre eux soit dans des réacteurs à neutrons rapides soit dans des installations dédiées comme les réacteurs assistés par accélérateurs (ADS). Les déchets restants devront être stockés dans des sites dédiés.

Au-delà des réacteurs à fission, les réacteurs à fusion sont un immense espoir malheureusement encore loin de déboucher sur une utilisation industrielle. Immense espoir car les réserves du combustible ultime de ces réacteurs, le deutérium (33g/m³ d'eau de mer) sont quasiment infinies.

Mais là aussi, de nombreux verrous technologiques doivent être levés. ITER a pour mission de montrer que la solution « tokamak » peut permettre de produire plus d'énergie que ce que consommera l'installation. Il restera ensuite à résoudre les problèmes de comportement des matériaux sous irradiation massive avant de parvenir à une solution industrialisable. Enfin il faudra aussi gérer les questions de déchets car aucune solution n'est idéale, les réacteurs à fusion conduisant aussi à des déchets radioactifs, certes en moindre quantité que les réacteurs à fission.

Le problème spécifique des transports

Les postes de consommation principaux de nos sociétés modernes sont d'une part les habitations et d'abord leur chauffage (et cli-

matiation), d'autre part les transports. On a vu que le premier poste doit être en partie couvert par le solaire (y compris les pompes à chaleur), le complément le plus adapté étant la biomasse ou l'électricité⁽⁶⁾ si l'on veut limiter l'effet de serre.

Dans le cas des transports, la situation est difficile. Il faudra s'habituer à se passer des produits pétroliers puisqu'ils vont se raréfier. Il faudra éviter de produire de l'essence à partir du charbon pour des raisons d'effet de serre et de pollution en ville. Il restera trois solutions : les biocarburants qui resteront limités à moins de 20 % des besoins en France, l'électricité et le vecteur « hydrogène ».

L'électricité

Son stockage dans des batteries pour assurer une autonomie suffisante du véhicule sans l'alourdir reste un problème actuellement. Les recherches dans ce domaine doivent fortement progresser pour parvenir aux performances souhaitées. La solution des véhicules hybrides permet dans l'intervalle d'optimiser l'efficacité énergétique et de limiter la pollution en ville, tout en limitant un peu les rejets de gaz carbonique. À terme, la solution électrique ne sera viable que si l'autonomie des véhicules devient suffisante. Les recharges de batteries se faisant pour l'essentiel la nuit, l'énergie primaire correspondante ne pourra pas être l'énergie solaire. Le nucléaire sera l'énergie primaire la plus adaptée.

L'hydrogène

Cette solution présente a priori l'avantage de permettre une autonomie raisonnable des véhicules, d'où sa supériorité actuelle sur l'électricité. Comme elle, l'hydrogène est un simple vecteur énergétique mais en aucun cas

une source d'énergie. En effet, pour produire de l'hydrogène, il faut par exemple effectuer une électrolyse de l'eau et l'énergie ensuite récupérable n'est rien d'autre que celle qu'il a fallu dépenser pour extraire l'hydrogène de l'eau. L'hydrogène n'est donc qu'un moyen de stockage, qui peut palier au fait que l'on ne sait pas stocker l'électricité.

On peut obtenir l'hydrogène par décomposition de l'eau, nous l'avons déjà dit, ou par reformage (ou autre conversion chimique) de produits pétroliers ou de gaz ; mais comme ceux-ci vont se raréfier dans les prochaines décennies, à terme, c'est la décomposition de l'eau qui constituera la meilleure solution. Elle pourra se faire soit en utilisant de l'électricité soit en dissociant directement l'eau à très haute température. Dans le premier cas, les sources primaires pourront être le solaire et le nucléaire. La thermodissociation de l'eau est actuellement envisagée dans certains réacteurs nucléaires de génération IV dont le fonctionnement est prévu à très haute température.

Une fois l'hydrogène produit, il faut le stocker dans le véhicule. Il y a là aussi un verrou technologique simplement lié au fait que l'hydrogène est un gaz, donc qu'il est difficile d'en mettre beaucoup dans un petit volume. On peut le liquéfier mais cette solution consomme de l'énergie. On peut le comprimer dans des bouteilles (c'est ce que l'on fait aujourd'hui) mais le poids des bouteilles est significatif si l'on veut comprimer suffisamment pour stocker suffisamment. Des recherches sont actuellement menées pour utiliser des hydrures métalliques. Il s'agit d'un mode de stockage solide de l'hydrogène. De nombreux travaux portent sur la capacité de certains alliages à adsorber l'hydrogène. L'avantage réel par rapport aux autres modes de stockage réside dans le fait que l'hydrogène est libéré à des pressions faibles, variant, suivant les hydrures, de quelques millibars à quelques bars. En revanche, il existe deux difficultés techniques : la première est la

(6) *Le géothermique restera marginal car trop peu abondant.*

nécessité de désorber l'hydrogène à un rythme défini par les besoins de la pile à combustible, située en aval, la seconde est le rapport entre la masse de carburant (hydrogène) stocké et la masse totale de la matrice, rapport aujourd'hui trop pénalisant.

L'utilisation de l'hydrogène peut se faire soit dans des moteurs thermiques, soit dans des piles à combustibles. La première solution présente l'inconvénient de son rendement médiocre ; la seconde, celui de l'utilisation de membranes très onéreuses et d'un fonctionnement qui s'accommode mal des conditions climatiques très variables que doit supporter une automobile. Des recherches sont activement menées pour progresser sur ces technologies.

Conclusion

Le problème de l'énergie est majeur et difficile à résoudre. Aucun mode de production n'est exempt de problème soit au niveau des ressources disponibles, soit au niveau de la pollution ou des déchets, soit au niveau de la contribution à l'effet de serre, soit au niveau des coûts. Il s'y ajoute aussi des questions de géopolitique et l'acceptabilité par le public qui n'est pas toujours fondée sur des arguments parfaitement raisonnés.

Les contraintes majeures pour l'avenir seront les quantités disponibles et le réchauffement climatique. La seule façon raisonnable de progresser est d'ajouter les contributions (limitées) des énergies renouvelables disponibles. On a vu que le solaire (thermique surtout) doit avoir toute sa place pour assurer le chauffage (voire la climatisation) des habitations. La biomasse doit être utilisée autant que faire se peut soit pour compléter le chauffage, soit pour contribuer aux transports. Mais tout cela ne sera pas suffisant. Il faudra continuer d'utiliser les énergies fossiles : le pétrole et le gaz (tant qu'il y en a) et le charbon, nettement

plus abondant (tout en séquestrant le CO₂ libéré pour limiter l'effet de serre). Le charbon devra donc être utilisé dans des installations centralisées et équipées. Dans ce panel, le nucléaire sera nécessaire pour assurer à la fois une production d'électricité et un développement de la filière hydrogène, ces deux vecteurs étant appelés à jouer un rôle croissant dans les transports.

Bien sûr, cela doit être assorti d'une volonté farouche d'économie et de meilleure efficacité énergétique. En tant que citoyens, nous avons tous un rôle à jouer dans cette démarche : en incitant nos politiques à gérer cette question comme une priorité, mais aussi en évitant nous-mêmes les gaspillages, en privilégiant les transports en commun, en ne laissant pas des lampes ou installations électriques inutilement allumées. Une lampe de 60 W allumée inutilement pendant un an par Français nécessite la production d'électricité de trois réacteurs nucléaires... que l'on pourrait économiser. Y pensons-nous ?

B. T.



Professeur d'université affecté à l'ENSI de Caen, **Bernard Tamain** effectue des recherches sur le Grand accélérateur national à ions lourds. Il est également chargé de mission au ministère de la Recherche où il participe à l'évaluation de la recherche en France (laboratoires, allocations de recherche, relations internationales...).