

Maîtrise de l'Énergie et changement climatique : quelles conséquences pour la R&D ?

Après une baisse des recherches dans le domaine de l'énergie depuis le début des années 90, une reprise des travaux de R&D s'amorce aujourd'hui pour progresser dans la voie du « développement soutenable ». Les recherches s'orientent autour de quatre pôles : la réduction des besoins énergétiques, l'amélioration des modes de production, le développement de nouveaux modes productifs et, enfin, la maîtrise d'une conception globale permettant de prendre en compte l'ensemble des éléments d'un système : système « bâtiment » ou routier, par exemple.

par Yves Bamberger
Directeur Recherche & Développement, EDF

Mois après mois, l'actualité nous montre de plus en plus que le développement des activités humaines commence à se heurter à la finitude des ressources de notre planète :

ainsi en est-il progressivement des minerais (silicium, cuivre, fer...) mais aussi des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon...) ou fissiles (uranium), qui ne sont renouvelables qu'à l'échelle des temps géologiques.

La question de l'énergie est certainement avec celle de la croissance de la population mondiale et la disponibilité de l'eau l'une des trois questions clés que l'humanité a à traiter dans les décennies qui viennent pour que la génération de nos petits-enfants puisse vivre « correctement », pas moins mal dans les pays développés, mieux dans les pays en voie de développement !

Pourquoi attacher tant d'importance à cette question de l'énergie ? Tout simplement parce que qui dit vie dit besoin en énergie. Or l'extraction des matières premières nécessaires, la production, le transport, l'utilisation de l'énergie ont d'une part de nombreux impacts sur les ressources disponibles pour les générations futures, mais ont d'autre part, dès à présent, des impacts sur l'environnement tant localement qu'à l'échelle mondiale (avec l'influence, presque certaine de l'activité humaine sur l'évolution climatique). Enfin, n'oublions pas qu'une partie des êtres humains ne dispose pas d'assez d'énergie.

Pour progresser dans la logique du « développement soutenable » c'est-à-dire agir simultanément sur les plans économique, environnemental et sociétal, une R&D forte au niveau mondial est un préalable aux décisions politiques, financières, économiques : après une baisse des recherches dans le domaine de l'énergie depuis le début des années 90, une remontée s'amorce en raison de la prise de conscience des

limites de toutes sortes mentionnées ci-dessus et tout spécialement parce que nous sortons d'une période d'abondance (relative) d'une énergie pas chère dans les pays développés. Un indice en est l'inscription de l'énergie comme une priorité du septième programme commun de recherche et développement de l'Europe (7^e PCRD).

La recherche dans le domaine de l'énergie peut être structurée autour de quatre pôles :

- réduire les besoins ;
- améliorer les modes de production actuels ;
- développer de nouveaux modes de production ;
- penser système !

Ces axes seront illustrés par quelques exemples souvent empruntés aux travaux de recherche d'EDF avec ses partenaires.

La R&D pour réduire les besoins

Les besoins énergétiques dépendent de la démographie (hypothèse d'une croissance jusqu'à 9 milliards d'habitants en 2050, puis stabilisation, voire baisse), de la croissance économique et surtout de l'efficacité énergétique que chaque acteur aura su développer. La plupart des scénarios d'estimation de ces besoins convergent vers 20 à 25 Gtep à horizon 2050, en supposant que les efforts en matière de MDE (maîtrise de l'énergie) restent à hauteur de ce qu'ils sont aujourd'hui...

Dans l'univers de contraintes (CO₂, raréfaction du pétrole...) auquel est confronté le monde, le bouquet énergé-

tique mondial pourrait ainsi évoluer sensiblement vers une situation soutenable (voir la figure 1) avec :

- une production d'environ 5 Gtep à base d'énergies renouvelables ou ENR ;
- une production « classique », nucléaire de quelques 2 Gtep (1 000 GW) et thermique de 4 Gtep seulement avec des énergies carbonées hors séquestration du gaz carbonique ;
- une production complémentaire qui serait issue de la combustion du charbon avec séquestration et captage du CO₂, incluant d'autres modes de production (nucléaire à cycle fermé du combustible dit « Génération IV », par exemple) ;

- une place de la MDE qui devrait devenir essentielle ; des efforts supplémentaires mais probablement accessibles ramèneraient une demande mondiale de 20-24 Gtep en tendancier à environ 15 Gtep, chiffre homogène avec une réduction de l'intensité énergétique de l'ordre de 3,5 % par an pour les pays les plus développés.

Ce scénario n'est évidemment pas le seul possible ! Dans tous les cas, il faudra non seulement déployer massivement les technologies existantes économiquement viables pour réduire la consommation d'énergie pour un usage donné (par exemple remplacer progressivement les réfrigérateurs d'une classe C par ceux d'une classe B moins gourmande en énergie par amélioration de la conception, des matériaux, du compresseur...) mais aussi développer des recherches pour continuer d'améliorer l'efficacité énergétique des procédés industriels existants, réduire la consommation d'énergie des bâtiments et des maisons, sortir progressivement du moteur à essence ou diesel dans le transport automobile notamment. Un premier exemple, majeur, pour la réduction de la demande en énergie est le secteur du bâtiment qui représente 40 % de l'énergie consommée en France comme en Europe, 65 millions de tonnes de CO₂ émises en France !

Directives européennes, Loi d'orientation sur l'énergie, en France, *Energy Efficiency Commitment*, en Angleterre, incitent déjà fortement bon nombre d'acteurs à promouvoir l'efficacité énergétique... fournisseurs d'énergie en

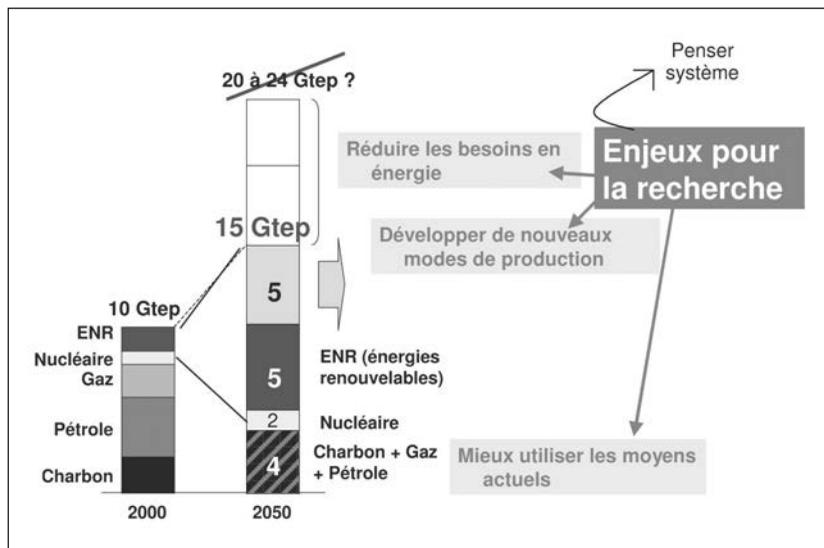


Fig. 1. - Bouquet énergétique soutenable à l'horizon 2050.

tête (exemple des certificats blancs en France).

Comme on ne construit presque plus de neuf en Europe, comme un bâtiment dure près d'une centaine d'années, la réussite ou l'échec de cette maîtrise se jouera donc largement dans les bâtiments existants.

La R&D y est attendue pour lever un certain nombre de verrous technologiques : trouver des super isolants faciles à poser, isoler par l'extérieur à un coût raisonnable, imaginer des fenêtres multi-fonctions, faire installer des pompes à chaleur haute température ou des micro-cogénération, intégrer des énergies renouvelables dans le bâtiment, développer des outils de diagnostic et d'aide à la décision.

Un second exemple, toujours dans le domaine du bâtiment, est la recherche de moyens de chauffage performants puisque plus de 60 % de l'énergie utilisée l'est pour le chauffage en France, davantage dans le Nord de l'Europe.

Ainsi, les pompes à chaleur (PAC) et, plus spécifiquement, celles dites à haute température, offrent une solution technique à haut rendement énergétique, qui durablement répond aux besoins de MDE (voir la figure 2).

Pour les logements neufs, les PAC sont le plus souvent couplées à des planchers à eau qui sont donc des « émetteurs intégrés au bâti ». Mais pour les opérations de rénovation, les PAC viennent se substituer aux chaudières à énergie fossile tout en conservant les

radiateurs à eau chaude classique. Les conserver oblige les PAC destinées à la rénovation à produire une eau de circulation plus chaude : c'est ici qu'intervient cette nouvelle génération de PAC dite « PAC haute température » dont la mise au point à un coût économiquement acceptable reste à achever.

Autre domaine fortement consommateur d'énergie avec un potentiel de MDE important : le transport routier. Selon l'AIE, d'ici 2020, les consommations d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre vont presque doubler sous l'effet de la croissance du trafic des véhicules personnels dans les pays en voie de développement. Dans les pays occidentaux, les investissements dans les infrastructures n'arriveront au mieux qu'à stabiliser les émissions de GES (gaz à effet de serre) à partir de 2015-2020. Leur réduction passe - pour être réaliste à court terme - par l'augmentation forte de l'efficacité énergétique du transport individuel.

Avec un transport traditionnel, le rendement d'un moteur est de 30 % et il lui faut un volume en énergie primaire de 300 pour produire un volume d'énergie utile égal à 100... à comparer aux 250 d'énergie primaire nécessaire à un véhicule hybride de type Prius.

Depuis quelques années, l'émergence du véhicule tout électrique est freinée par la relativement faible autonomie (environ 100 kms) et par le temps de recharge et de disponibilité d'une prise électrique là où stationnent les véhi-

cules. Et ce, malgré un coût compétitif de l'électricité par rapport à l'essence, et un faible nombre de kilomètres quotidiens effectués par la majorité des Français ! Les ruptures technologiques attendues sur les batteries, objets de travaux notamment en France, au Japon, en Chine et ailleurs, permettraient d'accroître l'autonomie du véhicule électrique et de la porter à 150 kms vers 2008 et 200 kms vers 2015. Dans un contexte où le prix du carburant continue à monter, ces ruptures aideraient le développement du véhicule électrique sur le marché des flottes captives et du véhicule utilitaire léger. Les avantages en terme de pollution sonore seraient, en outre, évidemment considérables, notamment en ville !

La R&D pour améliorer les modes de production actuels

Mieux utiliser les modes de production actuels peut se comprendre sous deux angles.

Le premier, c'est d'améliorer le rendement ou les caractéristiques environnementales des procédés utilisés en vue de la construction de nouvelles installations : ainsi en est-il d'une meilleure utilisation du combustible uranium dans les centrales nucléaires à eau pres-

surisée, du charbon dans les centrales thermiques classiques par des travaux de recherche sur la combustion et les brûleurs, de l'usage de l'eau (quantité et qualité de l'eau utilisée et rejetée).

Le second est d'améliorer le rendement et les caractéristiques environnementales des centrales et des installations existantes : il ne faut pas oublier en effet que, comme pour le bâtiment, le parc mondial des centrales électriques existantes, par exemple, a une durée de vie résiduelle moyenne de plusieurs dizaines d'années.

Les travaux de R&D relatifs à ces questions se partagent entre les constructeurs d'installations, les exploitants et les laboratoires universitaires ou publics. Ces recherches vont de la connaissance fine de la combustion de certains gaz à la résistance des matériaux à la fatigue thermique à haute température, de la dégradation des matériaux sous irradiation à la diminution de la quantité de poussières de combustion rejetées, il reste beaucoup de champs de recherche !

Un premier exemple de ce type de travaux concerne les centrales nucléaires d'EDF situées à proximité des cours d'eau. Celles-ci subissent des événements climatiques qui influent sur les conditions d'exploitation. En période chaude, les faibles débits et la température élevée de l'eau sont susceptibles

de créer des situations anormales pour le fonctionnement habituel des organes techniques. Ainsi, dans les années 90, l'exploitant avait constaté une dégradation du vide au condenseur l'obligeant, pour respecter les limites, à réduire la puissance jusqu'à 850 MW pendant plusieurs heures. Ces turbines sont dimensionnées pour fonctionner avec une limite théorique supérieure de 130 mbars de la pression au vide condenseur : cette limite, rarement atteinte, garantit que les aubages terminaux ne sont pas soumis à des vibrations d'amplitudes excessives.

Avec une méthode de mesure originale et une campagne de mesure adaptée, les chercheurs d'EDF ont ré-interrogé cette limite de 130 mbars et montré, avec le constructeur, qu'elle pouvait être, un certain nombre d'heures par an, repoussée à 150 mbars en toute sûreté. Cette disposition s'est révélée particulièrement bénéfique au cours de la période de canicule d'août 2003 (un événement climatique amené à se reproduire plus fréquemment dans les périodes futures). Ainsi, environ 50 % des tranches concernées ont été amenées à franchir ponctuellement le seuil des 130 mbars pour soutenir la production à hauteur de la demande en électricité.

Respecter les contraintes réglementaires et maîtriser les émissions polluantes, tel est l'un des soucis d'un producteur - propriétaire de centrales à charbon de grande puissance dans n'importe quel pays du monde. Avec la maîtrise des poussières et des oxydes de soufre, que l'on obtient en améliorant les dépoussiéreurs électrostatiques et en mettant en place des unités de désulfuration humides, il s'agit aussi d'assurer la maîtrise des oxydes d'azote (NOx) dont les seuils réglementaires passeront de 1000 mg/m³ à 400 mg/m³ par application des Directives européennes.

Le rôle de la R&D, dans ce cas particulier concernant aussi EDF, est de trouver l'équilibre subtil dans les phénomènes de combustion, qui agissent le plus souvent contradictoirement sur les NOx et le carbone imbrûlé. S'appuyant sur l'expérience de l'exploitation de centrales et sur des simulations 3D obtenues à partir du code de mécanique des fluides (*code-Saturne*) et de l'enchaîne-

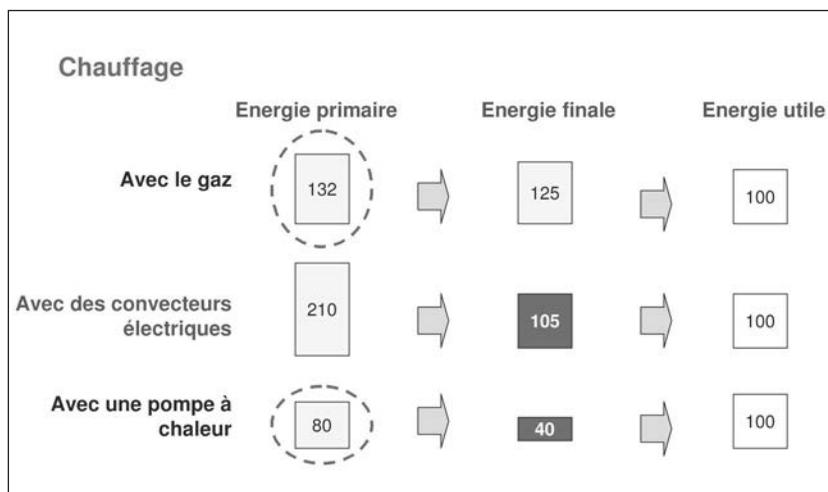


Fig. 2. - Les PAC (pompes à chaleur) utilisent l'énergie thermique contenue dans l'environnement : l'air, le sol et l'eau souterraine emmagasinent une grande quantité d'énergie thermique sans cesse renouvelée grâce au rayonnement solaire et aux pluies. En utilisant cette énergie renouvelable et gratuite, les PAC fournissent un chauffage très économique, grâce à un rendement énergétique inégalé. Comme l'indique le schéma : pour produire une valeur de 100 en énergie utile, il faut, en énergie primaire, respectivement 132, 210 et 80 pour un chauffage au gaz, un chauffage par convecteur et une pompe à chaleur.



ment d'un modèle fin de chimie des NOx appliqué à des zones homogènes de la chaudière, la R&D d'EDF a trouvé plusieurs configurations d'exploitation, qui minimisent la formation des NOx tout en préservant un taux d'imbrûlés cohérent avec la valorisation des cendres. Testées en vraie grandeur, elles ont montré qu'il est possible de réduire d'un facteur 2 le niveau global d'émission des NOx de la chaudière... et ce même en cas d'utilisation d'un charbon d'Afrique du Sud, pourtant réputé pour favoriser la formation des NOx.

Un troisième exemple est le champ des recherches relatives à l'eau. L'eau est une ressource fragile, de plus en plus marquée, du fait du développement de l'activité humaine mais surtout du fait du changement climatique, par ses « excès », les inondations, mais surtout par sa rareté, la sécheresse. L'eau est aussi très convoitée pour des usages variés : pour l'eau potable mais aussi pour les loisirs comme la pêche, le canoë-kayak...sans oublier l'irrigation. L'eau, en quantité et qualité, est une ressource stratégique pour le producteur d'énergie. Pour les ouvrages hydro-électriques bien sûr, mais aussi pour le refroidissement des centrales thermiques à flamme et nucléaires : il ne faut pas moins de 100 litres d'eau pour produire en circuit ouvert 1 kWh d'électricité. 5 litres d'eau sont encore nécessaires quand ces centrales sont équipées de réfrigérants atmosphériques. La qualité de l'eau est également essentielle à la production

d'électricité : sa température conditionne le rendement des centrales thermiques ainsi que ses caractéristiques physico-chimiques et biologiques.

L'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans les 50 années à venir est un sujet de recherche important pour un exploitant, car la durée de vie des ouvrages, hydrauliques, thermiques à flamme et nucléaires, est de plusieurs décennies. Ceci le conduit donc à se préoccuper de toute évolution de la ressource en eau qui pourrait intervenir à des échéances de plusieurs dizaines d'années et peser sur l'outil de production : par exemple l'estimation des débits de grands fleuves français et de la température de l'eau en cas d'un réchauffement climatique associé à un doublement du CO₂ dans l'atmosphère, afin d'optimiser l'ensemble des besoins en eau, entre centrales, barrages et parties prenantes.

Plus encore que les valeurs moyennes, c'est l'évolution des extrêmes qui sera la plus préoccupante, la variabilité accrue du climat pourra conduire à un renforcement de l'intensité des crues ou de la durée des étiages contre lesquelles il faudra se prémunir, en termes d'exploitation ou de dimensionnement des ouvrages de protection ; les progrès de la recherche sur les évolutions météorologiques à toutes échelles de temps et d'espace sont attendus, ne serait-ce que pour optimiser sur l'année l'usage des grands barrages qui restent et resteront encore longtemps en ce siècle une source majeure d'énergie renouvelable.

La R&D pour développer de nouveaux modes de production « durables »

Le troisième pôle pour les travaux de recherche dans le domaine de l'énergie est celui de la recherche de nouvelles sources d'énergie et de nouveaux moyens de production.

Au niveau des sources renouvelables on compte l'énergie solaire parvenant à la Terre, mais aussi les énergies liées aux mouvements des astres : énergie des marées, énergie du vent... La biomasse (le bois, la végétation...) est aussi une source à la fois très ancienne et toujours

renouvelée, à condition d'en respecter l'échelle de temps !

Au niveau des énergies renouvelables on peut aussi compter la fusion nucléaire, mais l'approche actuellement envisagée pour l'utiliser (la prochaine étape de recherche étant le réacteur ITER) ne conduira probablement pas à des centrales industrielles avant le dernier quart de ce siècle - ce qui ne signifie pas qu'on ne trouvera pas d'autres façons de la réaliser avant. En ce qui concerne le nucléaire, la mise au point industrielle de réacteur à « cycle fermé » du combustible (dit de quatrième génération) sera un pas significatif, attendu pour 2040 environ.

La conception puis la mise au point et le développement industriel de nouvelles filières de production sont l'objet de nombreuses incitations des gouvernements soit par le canal des budgets de recherche publique, soit par la mise en œuvre de taxes dans les phases finales.

Un premier exemple de moyen de production d'électricité, familier, populaire et prometteur est celui des panneaux photovoltaïques. Depuis près de 30 ans, les recherches dans le domaine du photovoltaïque se sont focalisées sur la technologie des cellules au silicium cristallin. De fait, l'amélioration des procédés de fabrication de ces cellules et modules de première génération



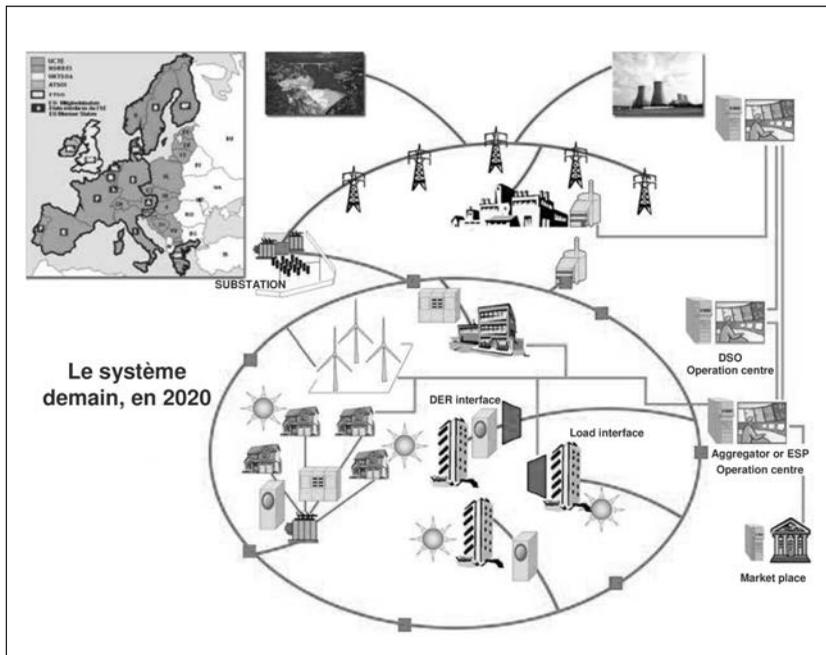


Fig. 3. - Réseau de distribution.

A l'instar des informaticiens qui ont réparti puissance de calcul et capacité de stockage bien au-delà des centres de calcul depuis les années 70, les électriciens vont aussi progressivement enrichir la palette des technologies disponibles dans leur domaine. Autrement dit, à côté des outils de production centralisée comme les centrales nucléaires et thermiques à flamme, les grands barrages, les outils petits ou moyens (du panneau solaire à l'éolienne, de la pile à combustible à la turbine...) vont se multiplier, à des rythmes liés aux incitations réglementaires, aux politiques et cultures locales, aux évolutions technologiques : le Bade-Württemberg, la région lyonnaise et la Catalogne sont dans des situations bien différentes !

Le réseau électrique ne sera plus simplement un réseau de distribution du courant mais aussi un réseau de circulation du courant, le stockant et le mettant à disposition au meilleur moment. Les outils de production décentralisés, les usages pourraient être télécommandés pour gérer les pointes, les transferts d'énergie et les interruptibilités de manière plus sophistiquée.

conjuguée à la croissance du marché des panneaux connectés au réseau (croissance moyenne de 31 % par an sur les 10 dernières années) a conduit à une décroissance régulière des coûts. Mais l'effort régulier sur les coûts, en admettant qu'il reste au même niveau, ne permettra pas au photovoltaïque de devenir compétitif par rapport aux grandes centrales classiques même en intégrant le coût des réseaux : des ruptures technologiques sont nécessaires. Aujourd'hui, deux ruptures sont annoncées à moyen et long terme, avec un coût estimé de production de l'électricité photovoltaïque proche du tarif d'achat des particuliers d'ici 10 à 15 ans et proche du prix de la base d'ici 30 à 50 ans :

- les cellules en couches minces, dites de deuxième génération, sont fabriquées à partir de couches minces de semi-conducteurs, silicium, tellurure de cadmium, ou diséléniure de cuivre et

d'indium, déposés sur un substrat ; selon les experts, elles devraient supplanter la première génération à horizon 10-15 ans ;

- les concepts avancés à très haut rendement, dits de troisième génération, qui sont des cellules encore au stade de la recherche théorique, offrent des perspectives à long terme (30 à 50 ans) et concilient structures en couches minces et très hauts rendements de conversion pouvant atteindre de 40 % à 75 %.

Ces concepts, comme ceux des autres systèmes techniques, sont à examiner non seulement sous l'angle de leur caractéristiques énergétiques et environnementales en fonctionnement mais aussi sur l'ensemble de leur cycle de vie, en incluant notamment l'énergie et les matériaux nécessaires à leur fabrication.

Autre exemple d'énergie renouvelable, l'hydrolienne, qui récupère l'énergie cinétique des courants marins au

moyen de turbines immergées. Cette énergie renouvelable possède les qualités suivantes : prédictibilité (les courants de marées peuvent être parfaitement calculés à l'avance en intensité et en direction), densité (la densité de l'eau permet d'utiliser des turbines plus compactes et plus performantes que celle des éoliennes), impact visuel limité (les machines peuvent être totalement immergées). En revanche, cette technologie présente plusieurs points faibles : la ressource est très localisée et peu de sites sont réellement disponibles, l'espace maritime est à partager entre les utilisateurs, la maintenance sur les appareils est délicate du fait d'une partie totalement immergée.

Le Royaume-Uni et la France possèdent environ respectivement 75 % et 20 % du potentiel de la ressource de l'hydrolien en Europe et 22 TWh/an pourraient être produits par cette filière à moyen terme. Le développement de l'hydrolien s'inscrit dans la stratégie de ces pays et est à l'origine de plusieurs projets : évaluer la maturité des technologies et de la filière hydrolienne en phase de développement, rechercher les sites français les plus prometteurs (caractérisation de la ressource au moyen de mesures en mer et de modélisation).

Enfin, dernier exemple, les éoliennes, pour lesquelles un développement important est attendu en Europe, avec une puissance éolienne installée en augmentation de plusieurs milliers de MW à l'horizon 2010-2015. Le potentiel éolien en France est inégalement réparti sur le territoire, et pour être économiquement rentable dans la durée, il dépend étroitement des conditions de vent, aujourd'hui et demain. Aussi, la recherche d'un producteur d'énergie développe-t-elle, en étroite relation avec Météo-France et des laboratoires spécialisés en météorologie, des cartographies de territoires afin d'identifier les meilleurs lieux pour implanter des éoliennes, ainsi que des modèles pour évaluer le productible, présent et futur, des parcs existants ou à venir. Récemment, EDF R&D a estimé des chroniques de production :

- horaires à partir de mesures de vent effectuées en France de 1993 à 2002 ;

- journalières à partir de reconstitutions (ré-analyses) de l'état de l'atmosphère sur l'Europe de 1950 à 2002.

Après validation sur les données observées dans les parcs éoliens français et allemands, ces chroniques ont été analysées pour connaître la variabilité saisonnière et annuelle, et la distribution des fluctuations. A terme, ceci permettra aussi de déterminer les leviers d'amélioration de la production (disponibilité, télégestion, contrôle commande, acoustique...).

Penser système

Dans tout ce qui précède, on a présenté des exemples « élémentaires » sur lesquels la recherche fondamentale ou appliquée est attendue : le matériau isolant à mettre sous le toit, le cycle combiné à gaz à haut rendement, le panneau solaire peu coûteux composé de matériaux abondants et non nocifs, etc. Pour mieux progresser, tant sur la maîtrise de l'énergie que sur le changement climatique, il est utile de « penser système ». Ainsi, le bâtiment peut être pensé comme un système avec ses murs, ses fenêtres, ses panneaux photovoltaïques, sa pompe à chaleur, son chauffe-eau solaire, l'ensemble des appareils utilisant de l'énergie pour la cuisson, les

loisirs... Il est clair que l'utilisation des technologies de l'information et de la communication pour coupler l'ensemble des éléments du « système bâtiment » est susceptible de permettre de réduire la quantité et la puissance maximale d'énergie utile, mais aussi réduire les rejets. C'est et ce sera l'objet de travaux de recherche et de développement technologiques adaptés à l'environnement et à la culture des pays et des régions.

Autre exemple, le système électrique à l'échelle d'une région ou d'un pays, voire davantage, est un système de « mutualisation de la consommation et de la production » : de la prise électrique de l'utilisateur final au barrage ou à la centrale thermique classique ou nucléaire, via le réseau, ce sont des centaines de milliers d'objets élémentaires qui ont été assemblés pour permettre une utilisation optimale des ressources. Le développement « optimal » des réseaux, leur utilisation quotidienne dans des conditions nouvelles sont aussi l'objet de travaux de recherche débouchant sur les logiciels opérationnels.

Des recherches sur d'autres grands systèmes techniques sont nécessaires pour progresser en matière de MDE et d'environnement : ainsi en est-il du système routier « intelligent » permettant à

l'utilisateur d'être informé en temps réel, via son GPS, de la situation du réseau ; nous n'en sommes certainement qu'au début et les chercheurs ont là un autre beau champ de travail pour les décennies qui viennent.

Vers des sources fiables et non polluantes d'énergie ?

L'évolution des travaux de recherche et développement nous laisse espérer l'avenir d'un monde meilleur. Laissons les derniers mots à Isaac Asimov et Paul Smith qui, il y a une quinzaine d'années, dans la « Marche des millénaires », écrivaient :

« S'il en est bien ainsi, les gens de l'an 3000 auront à leur disposition des sources fiables et non polluantes d'énergie, capables de durer des milliards d'années (c'est-à-dire autant que le Soleil lui-même), et ils vivront dans la paix. Les travaux les plus rebutants seront effectués par des machines, laissant à l'homme le loisir de se consacrer à la création à un niveau et avec une intensité inimaginables de nos jours. Aux humains de la fin du troisième millénaire, l'an 2000 apparaîtra alors comme le moment où notre espèce est sortie de l'enfance pour aborder l'adolescence et préparer l'âge adulte ». ●