

# Davantage d'électricité pour moins de CO<sub>2</sub>

Des solutions électriques efficaces au plan énergétique existent pour les différents secteurs consommateurs : bâtiments, industrie, transports. Leur substitution aux procédés actuels fondés sur des combustibles fossiles devrait permettre une réduction significative des émissions de CO<sub>2</sub>. En effet, grâce à l'hydraulique et au nucléaire, la plus grande part de l'électricité produite aujourd'hui en France n'utilise pas d'énergies fossiles et cette part devrait encore s'accroître dans l'avenir avec l'EPR mais aussi l'éolien et d'autres énergies renouvelables.

par Yves BAMBERGER\*

ÉNERGIE ET MATÉRIAUX :  
QUELQUES NOUVEAUX  
REGARDS

**D**es prises électriques dans nos maisons aux centrales nucléaires, des pylônes de nos campagnes aux grands barrages, le vingtième siècle nous a légué un fabuleux système technique : le système électrique, support essentiel de notre vie quotidienne et du fonctionnement de nos sociétés. Ce système permet de mutualiser une partie des besoins et de la fourniture en énergie. Dans les pays de l'OCDE, la « fée électricité » fournissait en 2005 environ 20 % de l'énergie que nous utilisons. Le développement de cette énergie, dite finale (par opposition à l'énergie primaire : charbon, pétrole...) va se poursuivre durant les décennies à venir, pour dépasser probablement les 30 % en 2030. Cette croissance du rôle de l'électricité sera l'un des supports de l'éco-efficacité énergétique, de la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> et de notre dépendance en combustibles fossiles – bref, une pièce maîtresse du développement durable – tant dans nos pays que dans les pays en émergence et les pays en développement où, malheureusement, le taux d'électrification est encore très faible.

## LES USAGES ÉCO-EFFICACES DE L'ÉLECTRICITÉ

Du côté des usages finaux, l'efficacité énergétique est devenue – à juste titre – un enjeu majeur : la raréfaction des énergies fossiles (pétrole puis gaz) et leur renchéris-

sement sans précédent illustrent la nécessité de réduire globalement les besoins en énergie dans les sociétés occidentales. Par ailleurs, l'impérieuse nécessité de réduire les effets de l'activité humaine sur le climat engage à développer les usages simultanément les plus sobres en matière de consommation d'énergie finale et peu émetteurs de gaz à effet de serre (GES).

Nous parlons, chez EDF, d'éco-efficacité énergétique des usages de l'énergie.

Avant d'aller plus loin, prenons un exemple d'éco-conception qui répond à ce double critère : la pompe à chaleur. Les équipes de chercheurs d'EDF viennent de faire franchir un pas significatif à cette technologie, qui permettra de chauffer une habitation et de produire l'eau chaude sanitaire, en remplacement d'une chaudière au fioul, sans modifier le réseau de chauffage. Ainsi, pour une maison de 160 m<sup>2</sup>, ce mode de chauffage permettra de diviser au moins par 2 la facture de chauffage et par 5 les émissions de CO<sub>2</sub>.

Chez EDF, le développement des ces usages efficaces et faiblement émetteurs de CO<sub>2</sub> s'appuie en partie sur des compétences historiques de recherche et de développement acquises dès le choc pétrolier de 1973, dans un contexte en partie similaire à celui que nous connaissons actuellement, au moins en ce qui concerne les ten-

\* Directeur de la Recherche du Groupe EDF, membre de l'Académie des Technologies.

sions sur le prix des énergies fossiles, principalement pétrole et gaz.

### LES BÂTIMENTS : PRIORITÉ À L'ISOLATION ET AUX POMPES À CHALEUR

Le secteur résidentiel est celui qui consomme le plus, les deux tiers des consommations de ce segment étant destinées au chauffage. Des efforts importants d'efficacité énergétique ont déjà été accomplis dans le résidentiel neuf, notamment grâce à des réglementations thermiques de plus en plus sévères. Mais, le taux de renouvellement du parc étant inférieur à 1 %, le levier principal d'efficacité énergétique dans ce secteur est la rénovation thermique des logements existants.

L'isolation de ces bâtiments est, dès lors, la première action d'efficacité énergétique. Dans ce domaine, et en relation avec les industriels du secteur, les équipes de recherche d'EDF ciblent leurs efforts sur deux innovations principales : l'isolation thermique par l'extérieur, pour les maisons et les immeubles collectifs, avec des modes de pose économiques et moins contraignants ; et l'isolation par l'intérieur au moyen de nouveaux isolants minces, comme les isolants sous vide, 7 à 8 fois moins épais que les produits actuels.

En matière d'éco-conception, le second geste consiste à intégrer au bâtiment des énergies renouvelables thermiques, en premier lieu les pompes à chaleur, technologie qui permet d'extraire des calories dans le milieu naturel (air, eau, sol) et de les restituer à l'intérieur du bâtiment (dans le réseau d'eau des radiateurs ou l'air ambiant), grâce à un compresseur alimenté à l'énergie électrique. L'énergie transmise au bâtiment est plusieurs fois supérieure à l'énergie électrique consommée : c'est le coefficient de performance, d'environ 3 pour les machines actuelles. La pompe à chaleur est une technologie clef pour réduire rapidement les émissions de CO<sub>2</sub> et les consommations d'énergies fossiles, et augmenter la production d'énergies renouvelables dans les bâtiments neufs et surtout dans les bâtiments existants. Après les développements évoqués plus haut qui permettront prochainement de remplacer les chaudières au fioul, nos efforts supplémentaires de R&D portent sur la compacité des composants, la réduction du bruit et la diminution des coûts de fabrication, afin de remplacer à moyen terme les chaudières brûlant du gaz, dont les émissions de CO<sub>2</sub> ne peuvent être significativement réduites.

La troisième action en matière d'éco-efficacité énergétique, en termes de quantité de CO<sub>2</sub> évitée comparée au coût de mise en œuvre, est la production locale d'énergie avec une source d'origine renouvelable, solaire ou bois. Outre les offres « Bleu Ciel », d'ores et déjà disponibles pour l'équipement de panneaux photovoltaïques, EDF mène des recherches en partenariat avec le CNRS et l'École Nationale Supérieure de Chimie sur une nouvelle technologie de capteurs, dite à couches

minces, afin d'améliorer le rendement de transformation de l'énergie solaire en électricité, et surtout de réduire les coûts de production des cellules.

Enfin, les nouvelles technologies de comptage et de gestion des appareils domestiques permettront aux clients de mieux maîtriser leur consommation énergétique.

Et pourquoi, dans quelques années, ne donnerait-on pas aux clients une information en temps réel sur le contenu en CO<sub>2</sub> du kWh électrique produit, afin de les sensibiliser sur l'utilisation des appareils durant les périodes « peu émettrices » et contribuer à lisser la pointe de charge et diminuer ainsi le recours aux moyens de production fortement « carbonés ».

Dans ce domaine, EDF est partenaire du projet « HOMES », dont l'objectif principal est de développer les architectures et composants de contrôle du bâtiment intelligent de demain, pour gagner jusqu'à 20 % d'économie d'énergie. Le projet regroupe des industriels (Schneider Electric, Philips Lighting, ST Micro...) et des laboratoires (CEA, CSTB [Centre Scientifique et Technique du Bâtiment]...).

### L'INDUSTRIE : GESTION DE L'ÉNERGIE, CHAUFFAGE PAR INDUCTION ET UTILISATION DE LA CHALEUR FATALE

Si l'efficacité énergétique dans l'industrie a crû de 2 à 3 % par an avant 1990, elle est revenue ensuite à une croissance plus modérée, de 1 % par an. Force est de constater aujourd'hui qu'il subsiste des potentiels d'efficacité énergétique très significatifs, dans ce secteur qui représente en Europe un tiers de la consommation d'énergie.

Le potentiel d'efficacité énergétique et de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> passe par trois leviers. D'une part, la mise en œuvre d'une gestion fine de l'énergie et l'optimisation des flux d'énergies au sein des usines, en interaction avec la conduite des procédés industriels ou la production d'utilités. On peut estimer que ces systèmes de gestion permettent d'économiser 10 % de l'énergie sur les sites bien gérés et beaucoup plus, de 20 à 30 %, dans un grand nombre de cas. Ils contribuent à éviter des dérives de réglage et à conserver une utilisation rationnelle de l'énergie au cours du temps.

Un second levier : l'induction, meilleure technologie disponible de chauffage de solides, bien implantée dans le traitement thermique des métaux et la fusion. Elle permet de doubler l'efficacité énergétique d'un four industriel : précise et de bon rendement, l'induction est utilisable soit pour chauffer directement des métaux, soit pour chauffer des fluides dans une cuve. Parmi ses nombreux avantages, citons sa flexibilité d'utilisation (modulation de puissance, reproductibilité des cycles de traitement...) et les gains de productivité, dus à la réduction des pertes de matière sur le produit par oxydation.

Surtout, le chauffage par induction a un rendement énergétique élevé par rapport au chauffage à flammes ou à vapeur et il peut ainsi permettre de diviser par 2 la consommation d'énergie. Son utilisation en « stop and go » (pas de préchauffage, ni de mise en veille) permet aussi l'obtention de gains énergétiques substantiels.

Autre sujet clé pour l'efficacité énergétique dans l'industrie, la valorisation de la chaleur dite 'fatale', qui peut être réalisée par des échangeurs de chaleur ou, moins classiquement, par une pompe à chaleur et par compression mécanique de vapeur (CMV). La CMV récupère de la vapeur « usagée » et lui redonne par compression des niveaux de température et de pression utiles dans le procédé. La concentration de liquides par évaporation, avec compression mécanique de vapeur, est une technique mature, intrinsèquement économe en énergie. Elle peut trouver des marchés potentiels importants dans la concentration de liquides en process (lait, lactosérum, liquides dans la chimie...) ou d'effluents. La consommation d'énergie finale peut être diminuée d'un facteur 10 à 20, selon qu'elle est ou non implantée sur des applications déjà performantes.

Pour la pompe à chaleur, au-delà de ses quelques applications actuelles, son véritable intérêt est la valorisation de chaleur en sortie de procédés. Les principaux secteurs concernés sont les industries du bois, les industries agroalimentaires et la chimie. Le nombre de pompes à chaleur implantées dans l'industrie est encore faible. La principale raison, souvent invoquée, est le temps de retour sur investissement, trop long. Toutefois, avec les évolutions actuelles des coûts des énergies, il n'y a aucun doute quant à l'intérêt énergétique et économique de la pompe à chaleur dans l'industrie. Le temps de retour sur investissement a diminué d'un facteur 2,5 entre 2002 et aujourd'hui.

On le voit, l'éco-conception énergétique dans l'industrie recèle des marges de progrès significatives.

#### LES TRANSPORTS : L'ENJEU DU VÉHICULE HYBRIDE RECHARGEABLE ET DU VÉHICULE ÉLECTRIQUE

Le secteur des transports représente en France environ un tiers de l'énergie finale consommée (dont 80 % pour les transports routiers) et un quart des émissions de CO<sub>2</sub>.

Depuis maintenant quelques années, les grands constructeurs automobiles travaillent sur le concept de véhicule hybride. La Toyota Prius II est une vraie réussite, du point de vue technique et commercial, et elle marque une rupture au niveau de l'offre. L'hybridation a permis de baisser la consommation d'un véhicule essence à 4,5 litres/100 km en cycle urbain, tout en gardant une autonomie et des performances identiques à celles d'un véhicule thermique de la même gamme. Néanmoins, l'autonomie sur la seule batterie reste relativement faible.

Certains constructeurs, dont Toyota, travaillent actuellement à une offre industrielle de véhicules hybrides rechargeables sur le réseau à l'aide d'une prise électrique « classique » et dotés d'un pack de batteries permettant d'assurer une autonomie suffisante en mode électrique pur. A l'horizon 2020, un parc d'un million de véhicules se rechargeant la nuit et faisant la moitié de leur kilométrage annuel en mode électrique pur (ce qui est réaliste, lorsque l'on étudie les habitudes de déplacement et les distances moyennes parcourues), éviterait le rejet de 1 million de tonnes de CO<sub>2</sub> et l'achat de 0,5 Mtep de carburant, sur leur durée de vie.

Les progrès constatés dernièrement sur les batteries – et les efforts mondiaux de R&D engagés sur les batteries connaissent actuellement un accroissement significatif – permettent aujourd'hui d'envisager de façon crédible le développement, puis le déploiement à moyen terme de tels véhicules. Les tensions observées sur le marché du pétrole renforcent la pertinence économique d'une telle évolution.

Le développement complémentaire de véhicules 100 % électriques rencontre également un regain d'intérêt, notamment pour les parcs de véhicules de sociétés.

#### DES SUBSTITUTIONS VERS L'ÉLECTRICITÉ BÉNÉFIQUES DANS LA MAJORITÉ DES PAYS EUROPÉENS

Nous le constatons, la substitution en France d'usages des combustibles fossiles par des usages électriques permet simultanément de réduire la consommation en énergies primaires fossiles, donc de diminuer la dépendance énergétique de la France, et de réduire les émissions de gaz à effet de serre. L'intérêt des substitutions vers l'électricité est évident, du fait du faible contenu en CO<sub>2</sub> du kWh électrique français. En ce qui concerne le parc hexagonal de production d'EDF, environ 95 % de l'électricité produite n'émet pas de CO<sub>2</sub>, du fait du recours à la production nucléaire et hydraulique, faisant d'EDF un des énergéticiens européens émettant le moins de gaz à effet de serre. Mais il est intéressant de noter que les technologies performantes de l'électricité (pompes à chaleur, induction industrielle, transports électriques...) conservent un bilan positif dans la majorité des autres pays européens, en comparaison des émissions de CO<sub>2</sub> des usages brûlant des combustibles fossiles, pétrole et gaz.

Ainsi, l'électrification progressive des usages de l'énergie, qui s'est engagée et développée tout au long du 20<sup>e</sup> siècle (éclairage, transport urbain et ferroviaire, appareils ménagers, technologies de l'information...) se poursuivra au 21<sup>e</sup> siècle, tout en permettant de réduire significativement les émissions de gaz à effet de serre.

## UNE PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DURABLEMENT PEU ÉMETTRICE DE CO<sub>2</sub> : UN MIX NUCLÉAIRE + ÉNERGIES RENOUVELABLES

Avec le développement des énergies renouvelables, le modèle historique du système électrique – grands moyens de production, transport, puis distribution pour amener les électrons jusqu'aux clients – va sensiblement évoluer. Le réseau de distribution, qui sera alimenté par l'ensemble des productions locales (panneaux photovoltaïques des maisons et des centrales solaires, éoliennes, biomasse, etc.) et par ses soutirages au réseau de transport tendra à devenir un réseau de « circulation » et de mutualisation de toutes ces contributions. Nous ne développerons pas ici son fonctionnement futur, à la fois de plus en plus central, et aussi de plus en plus complexe, mais profitons-en pour rappeler qu'un développement éco-efficace des énergies renouvelables n'a de sens, notamment en termes de sécurité et de foisonnement, que si elles sont mutualisées au sein du réseau de distribution. Oublions, donc, les idées d'autarcie locale en énergie, mis à part pour quelques cas bien spécifiques !

## QUELLES PERSPECTIVES POUR CERTAINES DES TECHNOLOGIES PARMIS LES PLUS PROMETTEUSES ?

Les décisions d'investissement de chacun des acteurs dans les futurs moyens de production d'électricité dits centralisés se fondent évidemment sur un calcul économique. Cependant, ce calcul a encore du mal à prendre en compte aisément la dimension « carbone », la tendance du marché des permis d'émissions en Europe n'étant, à tout le moins, pas très lisible aux horizons de temps concernés par ces décisions d'investissement.

En ce qui concerne les énergies renouvelables hors hydraulique, le développement des filières découle essentiellement des politiques d'incitation nationales : tarifs de rachat, certificats verts, etc.

Si nous nous plaçons maintenant d'un point de vue technologique, nous pouvons escompter de fortes ruptures dans les coûts de production (diminution par 4 ou 5, d'ici à 2030) et dans les rendements des futures cellules photovoltaïques. Même si son déploiement reste actuellement marginal (et il le restera encore de nombreuses années) en termes de puissance installée, le solaire photovoltaïque fera partie intégrante du futur mix de production, notamment avec le développement des cellules de troisième génération. En matière de bilan carbone, si la phase de production d'électricité est sans émissions de CO<sub>2</sub>, il ne faut pas omettre de comptabiliser les émissions liées à la fabrication des panneaux, étroitement liées au contenu en CO<sub>2</sub> du kWh utilisé : ainsi, le bilan carbone d'un panneau fabriqué en Chine est sensiblement plus

élevé que celui d'un panneau qui aurait été fabriqué en France...

La filière éolienne est relativement mature et les coûts de production d'électricité associés ont déjà bénéficié de baisses significatives. La question principale qui se pose, dans le cadre d'un déploiement massif de l'énergie éolienne, réside dans les difficultés à exploiter et intégrer dans le réseau cette production très peu flexible, tant que nous ne disposerons pas de moyens de stockage de l'énergie électrique efficaces et de grande capacité. Quant à l'éolien off-shore, il bénéficiera à son tour de baisses des coûts de production, en partie dus à l'effet de taille des turbines (environ 10, voire 15GW ?), qui compenseront en partie le renchérissement des matières premières que nous connaissons actuellement. L'entretien et la connexion de ces fermes éoliennes off-shore à la plaque continentale resteront toutefois d'un coût durablement élevé.

Un mot sur la capture et le stockage de CO<sub>2</sub>, ou « CCS », présenté par beaucoup comme la solution miracle à l'effet de serre. Effets d'annonce mis à part, il semble que de nombreuses difficultés technologiques doivent encore être surmontées pour envisager des opérations pilote de captage à grande échelle. La capture présente par ailleurs deux inconvénients majeurs : d'une part les procédés de captage consomment eux-mêmes beaucoup d'énergie et dégradent fortement le rendement de la centrale thermique ; d'autre part, cette capture sera très difficile à implanter sur les centrales existantes. Le concept même de centrales *capture-ready* se résume souvent à réserver de l'espace pour implanter à l'avenir les installations de capture du CO<sub>2</sub>, mais sans garantie aujourd'hui qu'elles puissent, demain, s'insérer de manière efficace dans la centrale. Les questions d'acceptabilité et de faisabilité pour le transport et le stockage du CO<sub>2</sub> sont autant de difficultés à surmonter, qui laissent présager qu'un déploiement massif du CCS ne pourra s'opérer avant 2025-2030.

Dans notre modeste revue des technologies, mentionnons également les nécessaires recherches sur le stockage d'électricité (à toutes les échelles), une des clés qui pourraient bouleverser le fonctionnement du système électrique à l'avenir. Son intérêt est double : favoriser l'intégration des énergies renouvelables et intermittentes, en permettant au couple EnR + stockage de fournir un kWh garanti, contribuer au lissage des pointes de consommation et substituer aux moyens de production fortement carbonés, sollicités durant ces périodes de pointe, l'énergie apportée par les moyens de stockage. EDF réalise une telle expérimentation dans l'île de la Réunion, avec une batterie électrochimique capable de délivrer une puissance de 1MW pendant 7 heures.

Les perspectives de développement des énergies renouvelables (photovoltaïque, éolien, énergies marines, biomasse...) ne permettent pas de penser raisonnablement que la somme de leur production puisse subvenir au socle des besoins en électricité de nos sociétés, même avec des programmes d'efficacité énergétique drastiques. Des moyens de production de grande capacité,

fonctionnant en base et en semi-base (c'est-à-dire à pleine puissance sur de longues durées) demeureront nécessaires, dans le futur mix de production d'électricité. Le choix du nucléaire répond à ce besoin et permet d'éviter un recours massif aux combustibles fossiles : moins d'émissions de CO<sub>2</sub> et moins de dépendance énergétique en sont les avantages immédiats.

Aujourd'hui, le parc de production d'EDF produit 95 % de son électricité sans émettre de CO<sub>2</sub>, grâce à l'hydraulique et au nucléaire. A l'horizon 2020, ces émissions vont encore significativement diminuer, grâce à la contribution de l'EPR [*European Pressurized Reactor*] de Flamanville, au développement croissant de l'éolien et à la modernisation ou au remplacement des centrales au charbon.

---

#### DEUX PILIERS DE L'ÉCO-CONCEPTION ÉNERGÉTIQUE : L'EFFICACITÉ ÉNERGÉTIQUE ET L'ÉLECTRIFICATION DES USAGES

Certains voudraient faire croire que les énergies fossiles, et en particulier le gaz, ont l'avantage en matière de bilan d'émissions de CO<sub>2</sub> dans une hypothèse de développement marginal de certains usages. Mais les chiffres des modèles et bilans énergétiques sont têtus :

l'intégration sur plusieurs années de telles options conduit inmanquablement à émettre significativement plus de gaz à effet de serre en France, par rapport à la situation actuelle !

Dès lors, le premier levier dans l'éco-conception de nos modes de consommation énergétique futurs est indubitablement l'efficacité énergétique, partout où elle peut être atteinte, sur l'ensemble des usages, y compris ceux utilisant l'électricité.

Ensuite, la poursuite de l'électrification des usages de l'énergie dans le bâtiment, l'industrie et les transports, dans une optique où le mix de production restera durablement peu émetteur de CO<sub>2</sub> (avec même une tendance baissière en France, à l'horizon 2020), permet de s'inscrire dans les objectifs ambitieux de réduction des GES. Dans plusieurs pays d'Europe, le recours annoncé aux centrales nucléaires doit également répondre au double enjeu de diminution de la dépendance aux énergies fossiles et de la cible de réduction du contenu en CO<sub>2</sub> du kWh produit, cible à laquelle concourt également le développement des énergies renouvelables.

Le fait que chaque pays en Europe et dans le monde s'astreigne à de telles ambitions pour « décarboner » son parc de production électrique à moyen terme milite en faveur de « davantage d'électricité pour moins de CO<sub>2</sub> ».