

Gérer les énergies électriques intermittentes : les perspectives ouvertes par la recherche

Par Bernard BIGOT*

Au-delà de la difficile question des éventuels surcoûts prévisibles du kWh unitaire introduits sur le réseau et qu'il faut tenter de rendre aussi faibles que possible par l'amélioration des technologies de captage et de conversion, l'intégration en proportions croissantes d'électricité produite à partir d'énergies renouvelables dans notre consommation nationale, d'abord en substitution aux combustibles fossiles, pose à la recherche des défis afin de limiter les contraintes dues au caractère intermittent de la plupart des énergies précitées. Les solutions proposées passent par le développement de capacités de stockage local ou centralisé performantes sur le plan technique tout autant qu'économique et par l'introduction des technologies de l'information dans les réseaux et les équipements électriques afin d'inverser la logique qui prévaut actuellement, de façon à ce que la demande s'ajuste désormais à l'offre, et non l'inverse, certes dans des proportions sans doute limitées, mais indispensables.

La France a le besoin impérieux de réduire fortement sa dépendance vis-à-vis des énergies fossiles. Elle en a consommé en 2010 134 millions de tonnes équivalent pétrole, soit 51 % de notre consommation d'énergie primaire et 70 % de notre consommation finale. Nous importons plus de 98 % de ce que nous consommons. La première raison est, bien sûr, qu'à l'échelle mondiale, l'exploitation massive de ces ressources, dont la disponibilité au rythme où nous les consommons n'est au mieux que d'un ou deux siècles, réduit d'autant cette durée et rapproche inexorablement la date de leur épuisement, privant ainsi les générations futures de leur usage. La seconde est l'impact fortement négatif, désormais de plus en plus probable, si ce n'est avéré, que leur combustion massive a sur l'environnement, la santé des populations et l'évolution du climat. La troisième est, pour la France, le coût de plus en plus insupportable que leur importation représente pour notre balance commerciale : nous avons dû dépenser 62 milliards d'euros en 2011 pour acheter sensiblement la même quantité de ces combustibles fossiles qu'en 2005, alors que nous n'avions dû déboursier, au titre de cette même année, que 23 milliards d'euros, soit une augmentation annuelle moyenne de + 28 % au cours de ces six dernières années, au point de représenter désormais plus de 90 % de notre déficit commercial !

Pour réduire cette dépendance, il nous faut économiser ces énergies, c'est-à-dire réduire l'ampleur des usages qui

font appel à ces précieuses ressources, et il nous faut, par conséquent, augmenter l'efficacité énergétique des technologies les plus consommatrices d'énergie. De même, il nous faut substituer aussi largement que cela est techniquement et économiquement possible des énergies renouvelables à notre consommation d'énergies fossiles. À cet égard, il est impératif de bien veiller à ne pas réduire notre capacité de production nucléaire – si nous en avons l'intention – avant d'avoir pu constater la faisabilité technique et économique de cette substitution massive et durable d'énergies renouvelables à notre consommation de produits fossiles. Sachant le poids que ces énergies ont dans les transports et le bâtiment, c'est dans ces domaines que doivent s'opérer en priorité le recours à la chaleur renouvelable et la conversion du brûleur à la pompe à chaleur et du moteur thermique au moteur électrique. Une fois cette constatation, je dirais même cette démonstration clairement établie, nous pourrions alors ajuster au mieux de nos intérêts les capacités respectives de production de chacune des sources d'énergie qu'elles soient d'origines renouvelable, nucléaire ou fossile, dont nous aurons globalement besoin pour les décennies à venir. Le défi auquel la recherche scientifique et la recherche technologique sont actuellement confrontées est celui de développer les technologies qui permettront de faire rapidement le meilleur usage des énergies renouvelables disponibles sur notre territoire et ainsi de réduire notre consommation d'énergie fossile.

Ces énergies se présentent toutes, en termes de consommation finale, soit sous forme de chaleur (solaire thermique, biomasse, biogaz, géothermie), soit sous forme d'électricité (hydraulique, photovoltaïque, solaire à concentration, éolien, hydrolien, énergie houlomotrice, conversion de la chaleur d'origine renouvelable en électricité,...). *In fine*, toutes, avec des rendements et donc des prix de production très variables, sont des sources potentielles d'électricité, laquelle est un vecteur particulièrement bien adapté aux besoins de nos sociétés modernes.

À l'exception des sources géothermiques, de l'hydraulique au fil de l'eau et de la chaleur issue de la biomasse ou du biogaz, toutes ces énergies ont un caractère intermittent, c'est-à-dire qu'il n'est pas possible de tableur sur elles pour garantir que le réseau de distribution électrique sera en capacité, à tout instant, de satisfaire la demande des consommateurs. L'enjeu, pour la recherche, au-delà de contribuer à l'optimisation économique du système de production, de stockage, de distribution et de consommation d'énergie électrique que nos concitoyens choisiront, est de pouvoir gérer aussi efficacement que cela est techniquement possible ce handicap de l'intermittence des énergies renouvelables productrices d'électricité dans une société fortement urbanisée et qui a l'ambition d'accroître sa production industrielle, le confort de vie de ses membres et la qualité des services qui leur sont offerts, ce qui exige majoritairement une énergie électrique disponible « à volonté ». Un véritable défi est cet objectif d'une capacité de l'offre susceptible de répondre en permanence à la demande d'électricité dans un pays où la puissance instantanée requise par les consommateurs varie sur l'ensemble de l'année entre 30 milliards de watts (GW) et plus de 105 GW, et qui, sur une même journée, peut varier de 30 GW à 60 GW en été, ou de 60 GW à 100 GW en hiver, ou encore où la consommation hebdomadaire nationale varie de 10 000 GWh fin décembre à 6 500 GWh à la mi-août, sachant que les variations de puissance requise peuvent atteindre jusqu'à 8 GW par heure !

D'un autre côté, ainsi qu'en fait état le récent rapport *Eolien et photovoltaïque : Enjeux énergétiques, industriels et sociétaux* de septembre 2012 du Conseil général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies et du Conseil général de l'Environnement et du Développement durable remis aux ministres en charge de l'Énergie et de l'Industrie, si nous développons, en France métropolitaine, les énergies renouvelables, les installations éoliennes terrestres pourraient produire utilement, en équivalent pleine puissance, près de 2 000 h en moyenne sur les 8 760 heures de l'année, la production des installations éoliennes marines serait de l'ordre de 3 000 heures et celle des installations photovoltaïques se situerait dans une fourchette allant de 1 300 heures à 1 700 heures (selon les régions).

Sur l'exemple précis de la période de grand froid qu'a connue la France entre le 1^{er} et le 14 février 2012, alors que la puissance électrique consommée a été comprise entre 70 et 105 GW, avec des variations jour-nuit de plus de 20 GW, et alors que la puissance nucléaire installée utilisable était de 62 GW, la puissance éolienne continentale

installée utilisable était de 6,5 GW et la puissance photovoltaïque installée utilisable était de 2,4 GW. Rapportée à une puissance de 1 GW installée, la puissance délivrée par les installations nucléaires a été de 0,99 GW + ou - 0,01 GW, celle délivrée par les installations éoliennes a été comprise entre 0,1 GW et 0,6 GW, avec des variations d'un jour à l'autre de plus de 0,4 GW, pour une moyenne, sur la période, de l'ordre de 0,25 GW. Enfin, la puissance délivrée par les installations photovoltaïques a été comprise entre 0,0 GW et 0,4 GW, avec des variations du maximum d'un jour à l'autre de plus de 0,3 GW, pour une moyenne, sur la période considérée, de 0,05 GW (H. Flocard et J-P. Le Gorgeu, *L'électricité pendant la vague de froid de février 2012*, Sauvons le Climat, mars 2012).

Il faut ajouter à ces données le fait que l'énergie éolienne peut connaître des sautes brutales de production difficilement prévisibles (par exemple, lorsque le vent dépasse la vitesse maximum acceptable, toutes les machines d'un champ éolien vont s'arrêter au même moment, par l'effet d'une mise en sécurité automatique).

L'hydroélectricité dont nous bénéficions connaît, quant à elle, des variations liées aux précipitations. Ces variations sont relativement amples, avec une production annuelle parfois supérieure de 15 % à la moyenne des deux décennies précédentes, et pouvant être jusqu'à 30 % inférieure lors des années de très faible pluviométrie. La puissance installée, qui est de 24 GW (dont 12 GW de puissance de pointe mobilisables en quelques minutes), suffit juste à assurer la sécurité de notre système électrique.

L'utilisation de la biomasse pour produire de l'électricité dans une centrale à flamme pendant les périodes de pointe est une autre possibilité. Sachant que notre parc forestier représente plus de 16 millions d'hectares, qu'un hectare produit par an en moyenne par photosynthèse de la biomasse à hauteur d'environ 5 tonnes d'équivalent pétrole, la production annuelle renouvelable de bois représente, en métropole, environ 35 millions de tonnes équivalent pétrole. Environ 20 % de ce volume sont déjà utilisés à des fins de chauffage domestique. Le rendement en électricité lorsque l'on utilise cette ressource est cependant modeste (30 %), ce qui invite à n'y faire appel que dans des circonstances où les autres ressources sont déjà entièrement mobilisées.

Ces données précises donnent la mesure des défis que doivent relever la recherche et l'industrie pour incorporer dans notre consommation électrique une proportion importante d'énergies renouvelables. Le problème n'est pas la quantité annuelle d'énergie renouvelable disponible sur le territoire national (elle est près de mille fois supérieure à celle que nous consommons). Le problème, c'est notre capacité à la capter, à la convertir en chaleur ou en électricité, et à la stocker pour en disposer quand nous en aurons besoin.

La première piste que la recherche doit explorer, c'est, de notre point de vue, le stockage de l'énergie électrique, de manière plus ou moins directe, ce qui inclut le stockage de la chaleur avant de la convertir en électricité, ou

encore la conversion de l'électricité en hydrogène qui sera utilisé en tant que tel ou pour produire de l'électricité ou des biocarburants de seconde génération dans un procédé impliquant une gazéification de biomasse non destinée à un usage alimentaire ou industriel.

Le mode de stockage de l'électricité le plus mature, c'est-à-dire là où les progrès technologiques que la recherche peut apporter à l'industrie sont relativement limités (matériaux, électroniques de puissance,...), fait appel à l'hydraulique : ce sont les STEP (stations de transfert d'énergie par pompage), qui pompent de l'eau d'un niveau bas pour la réinjecter à un niveau plus élevé pour stocker l'énergie sous forme gravitationnelle. Le rendement d'un cycle de ces STEP est compris entre 70 et 80 %. La seule limite est la disponibilité de sites aménageables. Être en capacité de stocker 1 % de notre consommation annuelle d'électricité conduirait à disposer de réservoirs d'un volume total de l'ordre de 5 milliards de m³ d'eau utilisables à cette fin, et chutant d'une hauteur de 40 m environ (10 m³ d'eau chutant de 36 m produisent 1 kWh !) sachant que 75 % des barrages français ont une chute inférieure à 40 m et que la chute la plus grande est de 180 m. Pour prendre la mesure de ce que cela signifie, songeons que le volume total d'eau stockable dans les dix plus grands barrages français représente 8 milliards de m³ et que l'expérience montre que la capacité annuelle de turbinage d'une STEP ne peut guère représenter plus de cinq fois sa capacité totale de stockage.

Une autre voie de stockage de l'électricité, encore pratiquement non exploitée dans notre pays, est celle du stockage d'air comprimé dans des cavernes souterraines naturelles. Les puissances d'énergie électrique stockables sont de l'ordre de quelques dixièmes de GW à quelques unités, avec des rendements de l'ordre de 50 %. La recherche doit se mobiliser sur la détection géophysique de réservoirs offrant les volumes souhaités et la résistance requise aux pressions envisagées, ainsi que sur les matériaux polymères qui, injectés dans les cavités considérées, en assureront la parfaite étanchéité, ou encore sur l'optimisation des capacités des compresseurs et des turbines à air comprimé en termes de performances intrinsèques et de durée de vie.

La voie la plus directe est celle des batteries électrochimiques. L'enjeu actuel le plus fort est de mettre au point des batteries capables d'alimenter des véhicules électriques ou des stations fixes de production d'électricité renouvelable dans de bonnes conditions de sécurité, en limitant les pertes d'électricité dans le temps en cas de non-usage, avec des capacités adaptées en termes de nombres de cycles de charge/décharge, de temps de charge et de densité d'énergie stockée permettant l'autonomie recherchée pour des coûts acceptables. Les générations techniques de batteries se succèdent (plomb-acide, pile alcaline, cadmium-nickel, nickel-zinc, lithium-soufre, lithium-air, lithium métallique, lithium-ion, lithium-polymères, lithium-fer phosphate,...). Le rendement du cycle charge-décharge atteint pour les meilleures options désormais 80 % et le nombre de cycles sans dégradation

notable des performances est désormais de plus de 8 000, ce qui correspond à une durée de vie de plus de vingt années. En quinze ans, la recherche a permis qu'une batterie d'un poids de 150 kg équivalent à celui d'un moteur thermique permette de passer de 45 kilomètres d'autonomie à 250.

Des progrès très spectaculaires ont été obtenus au cours des dernières années en termes de sécurité, de densité de stockage, de taux d'autodécharge et de densité énergétique. Songeons que si la totalité de notre parc automobile de voitures particulières et de véhicules particuliers qui parcourent quotidiennement moins de 250 km (environ 32 millions de véhicules), soit 90 % du parc actuel, était dotée d'une motorisation électrique, avec le kilométrage actuellement parcouru, la quantité d'électricité supplémentaire à produire ne serait supérieure que de 15 % à ce qu'elle est aujourd'hui.

Puisque ces voitures seraient immobilisées plus de 20 h par jour, le couplage des technologies de l'information à leur connexion au réseau électrique en vue de leur recharge permettrait au responsable du réseau de réaliser une réelle optimisation du stockage de l'électricité au plan national. Cette piste du véhicule électrique est sans aucun doute parmi les plus prometteuses puisque qu'à la fois, on réduit la consommation de pétrole et on traite le problème du stockage.

Ainsi, au-delà des recherches à conduire sur les performances et les coûts de production des batteries, depuis les composés chimiques dont sont faits les électrodes et les électrolytes jusqu'aux procédés d'assemblage et aux systèmes de gestion optimisée de l'électricité dans le véhicule, en veillant à ce que la plage de fonctionnement de la batterie demeure toujours à l'intérieur de la zone qui en assure un vieillissement aussi lent que souhaité, c'est sur toute la chaîne de transfert de l'électricité que la recherche doit se mobiliser, y compris dans un avenir que l'on espère le plus proche possible, pour atteindre une capacité de recharge à partir du réseau ou directement à partir des installations de production locale, solaire ou éolienne, et ce sans fil, par la voie électromagnétique.

L'hydrogène, enfin, est un moyen possible pour la gestion de l'intermittence des sources électriques d'origine renouvelable. Il serait produit par électrolyse de l'eau à haute température dans les périodes d'excédent d'électricité, avec la possibilité de le stocker sous forme comprimée ou par adsorption sur des solides poreux, puis de le récupérer pour produire de l'électricité grâce à une pile à combustible (le rendement du cycle complet, relativement faible, est actuellement de l'ordre de 30 %), ou encore de mélanger cet hydrogène au gaz naturel qui circule sur le réseau gazier, ce qui peut être fait dans une proportion allant jusqu'à 25 % sans modification des brûleurs, ou bien encore de le combiner au fur et à mesure de sa production avec le résultat de la gazéification de la biomasse qui aurait été collectée et stockée à cette fin pour produire la stœchiométrie adéquate sans perte de carbone, en vue de produire du bio-kérosène ou du biodiesel d'une grande pureté.

Enfin, il est possible de stocker la chaleur sous une grande variété de formes, par exemple en chauffant avec le rayonnement solaire un fluide (comme un mélange de sels fondus) ou, tout simplement, de l'eau dans un réservoir souterrain, qui restituera son énergie au moment choisi, pour ensuite faire fonctionner une turbine.

Il existe bien d'autres moyens de stocker les énergies renouvelables intermittentes pour une restitution ultérieure sous forme d'électricité : les volants d'inertie, la production de gaz liquéfié., des moyens que la recherche a pour mission d'optimiser.

Une autre voie de gestion maîtrisée de l'électricité intermittente consiste à mettre de l'intelligence dans les réseaux afin que le consommateur optimise son besoin d'électricité en privilégiant l'appel au réseau au moment où la production serait en excès par rapport à l'offre, et son retrait dans cas contraire. C'est la technique bien connue de l'effacement. Les technologies de l'information avec l'usage de capteurs électroniques au sein des équipements électriques et de moyens de transmission adaptés constituent un potentiel encore largement sous-exploité, que la recherche peut aider à déployer.

Afin de réduire les coûts d'investissements et de maintenance des réseaux, la stratégie que devrait adopter notre pays serait de consommer aussi largement que possible l'électricité d'origine renouvelable au niveau local, là où elle est produite. Songeons qu'en Allemagne, on a recensé, en 2011, 1 085 arrêts forcés d'éoliennes pendant 107 jours à cause de vents d'une force trop élevée conduisant à produire plus d'électricité que le réseau en place ne

pouvait en transporter. Développer un réseau capillaire dimensionné pour écouler la production maximale des éoliennes ou des panneaux solaires d'une région, alors que cette capacité ne sera atteinte que pendant une dizaine d'heures dans l'année, serait une aberration économique. Un stockage local qui effacerait ces pics de production est une solution sans doute beaucoup moins onéreuse.

Le développement des énergies intermittentes productrices d'électricité est une opportunité pour notre pays. Il nous permettra de réduire notre dépendance énergétique vis-à-vis des importations onéreuses de combustibles fossiles, tout en réduisant nos émissions de gaz à effet de serre. Tout l'enjeu est de le faire dans des conditions qui préservent l'équilibre permanent entre l'offre et la demande et dans des conditions de coûts auxquelles nos concitoyens sont désormais fortement attachés et qui sont indispensables à l'activité des entreprises comme à la santé financière des ménages. Cela ne se fera pas sans d'importants développements technologiques pour réduire le prix de ces énergies ainsi produites et le handicap de leur intermittence par leur stockage local et centralisé et par l'intégration d'intelligence dans les réseaux de distribution et les équipements électriques. La recherche est mobilisée pour relever les défis posés par ces nécessaires développements technologiques.

Note

* Administrateur général du CEA.