

Le stockage de l'électricité

La problématique des énergies alternatives

Les énergies alternatives sont sorties de la marginalité. Avec 106 000 MW d'éolien et 69 000 MW de photovoltaïque, elles représentaient, à la fin 2012, 18 % de la puissance installée en Europe et assuraient environ 10 % de la production totale d'électricité (7 % pour l'éolien et 3 % pour le photovoltaïque). Dans certains pays, les proportions sont plus importantes : en Allemagne l'éolien couvre à présent 11 % de la consommation d'électricité du pays et cette proportion atteint 16 % en Espagne (contre 3,1 % seulement en France pour 7 560 MW installés).

Cette évolution impressionnante est le résultat d'un effort d'investissement considérable : sur 44 600 MW de capacités nouvelles installées en Europe en 2012, 37 % (16 750 MW) relevaient de la filière photovoltaïque et 27 % de la filière éolienne (11 895 MW). Le volume d'investissement correspondant peut être évalué aux environs 65 Md €. Cet effort s'inscrit dans la ligne du mouvement largement amorcé en faveur d'une transition énergétique en direction des énergies non carbonées. Elle ne va pas cependant sans soulever de difficiles problèmes dont l'importance s'est révélée au fur et à mesure que la part des énergies alternatives dans le mix électrique s'est accrue.

Les énergies alternatives sont source de difficultés techniques pour les exploitants des réseaux, dès lors que leur apport devient significatif. La principale difficulté réside dans leur caractère intermittent et assez largement aléatoire. Les énergies alternatives ne sont pas forcément disponibles au moment où l'on en aurait besoin et il faut donc leur adjoindre des moyens de "back up" qui viennent renchérir l'investissement et dégrader le bilan en émissions de CO₂. Mais l'intermittence n'est pas le seul problème : les énergies solaire et éolienne sont en règle générale décentralisées, elles échappent au contrôle du réseau et ne participent pas à sa stabilisation en fréquence. Bien au contraire, du fait de l'absence de grosses machines tournantes, elles ne disposent que d'une inertie limitée, voire nulle dans le cas du photovoltaïque, pour faire face à la vicissitude des vents et aux aléas de l'ensoleillement. Un simple passage nuageux au-dessus d'une grosse centrale solaire peut entraîner des fluctuations rapides et importantes auxquelles le réseau doit immédiatement faire face.



JEAN-PIERRE HAUET
ASSOCIATE PARTNER
KB INTELLIGENCE
MEMBRE EMÉRITE
DE LA SEE

Les énergies alternatives sont sources d'épineux problèmes économiques et financiers. Bénéficiant de tarifs de rachat avantageux dans la plupart des pays, elles font peser sur le consommateur des charges qui sont à présent souvent jugées excessives : 20,4 Md € en Allemagne en 2012, 31,6 Md € en 2013, prélevés par le biais de la taxe EEG similaire à la CSPE instituée en France, laquelle devrait s'élever, selon les calculs de la CRE, en ce qui concerne les seules énergies renouvelables, à 3 Md € en 2013 avec des perspectives de croissance importantes sur les prochaines années.

Par ailleurs les mécanismes d'obligation de rachat conduisent à des situations absurdes : les fournisseurs historiques (en France essentiellement EDF) sont tenus depuis la loi du 3 janvier 2003 de racheter les productions d'origine renouvelable à des prix qui se situent, en France, aux environs de 85 €/MWh pour l'éolien terrestre et de 120 à 250 €/MWh pour le photovoltaïque. Il se peut que ces productions soient utiles et contribuent à satisfaire les besoins. Mais il arrive de plus en plus souvent qu'elles soient non seulement inutiles mais préjudiciables au bon fonctionnement du système électrique. En cas de demande faible, le dimanche par exemple, et d'apports massifs du solaire et de l'éolien, les opérateurs ne disposent pas forcément des capacités de transport nécessaires à l'évacuation de cette production et son écoulement peut nécessiter la mise à l'arrêt coûteuse de moyens de production fonctionnant en base ou en semi-base. On voit apparaître en conséquence sur les marchés spots de l'électricité des prix négatifs du MWh. Après l'Allemagne, La France a été touchée pour la première fois par ce syndrome le 16 juin 2013 avec des prix du MWh descendant jusqu'à -188,51 € pour le bloc du matin sur la place de marché de l'EPEX. Ce genre de situation appelle une sérieuse réflexion sur la possibilité de conserver en l'état les mécanismes qui ont permis le décollage des énergies alternatives mais qui ne sont plus adaptés dès lors que le stade de la maturité a été atteint.

Le stockage n'est pas une solution miracle

Pour pallier ces difficultés, techniques et économiques, l'idée s'est répandue qu'il fallait développer le stockage de

l'électricité. Nous verrons plus loin que le stockage peut effectivement constituer une solution à certains des problèmes posés par l'intégration des énergies alternatives dans les réseaux. Mais beaucoup pensent que, si l'on parvient à stocker convenablement l'électricité, alors il suffira de stocker la production des énergies alternatives lorsqu'elle vient à être excédentaire pour la relâcher lorsqu'elle redevient utile et améliorer ce faisant sa valorisation et donc la compétitivité de la filière considérée. Cette idée du « stockage réponse universelle à l'intermittence » a été reprise dans de nombreux travaux et dans les déclarations de personnalités éminentes. Elle a pris d'autant plus corps que les producteurs allemands qui ont du mal à évacuer la production d'origine éolienne du Nord du pays, envisagent différentes solutions¹ pour la valoriser, en particulier la production par l'électrolyse d'hydrogène destiné à la méthanation ou à la réinjection en faible proportion sur le réseau de gaz².

Malheureusement cette façon de voir relève assez largement du sophisme. Le stockage a nécessairement un coût : coût d'investissement, coût d'exploitation et renchérissement du kWh restitué lié à une efficacité toujours inférieure à 1 et oscillant selon les technologies entre 25 et 95 %. Ce coût s'ajoute au prix de l'électricité stockée et vient donc le renchérir. L'un des obstacles auxquels les énergies alternatives sont confrontées résidant dans leur coût de production, le stockage ne peut pas constituer un moyen de le diminuer. On notera que dans les systèmes modernes de production industrielle, les efforts ont porté au cours des dernières années sur la recherche d'un fonctionnement en flux tendu, en supprimant les stocks et non pas en en créant de nouveaux.

Bien évidemment, le stockage n'accroît pas la durée moyenne de fonctionnement des moyens de production basés sur les énergies alternatives qui varie, selon les technologies et selon les régions, de 1 500 à 3 000 h/an³. En outre, si l'on sait stocker l'électricité, il faut mieux stocker de l'énergie produite à bon marché, ce qui n'est pas aujourd'hui la vertu première des productions d'électricité d'origine renouvelable. Bien évidemment, le stockage de l'électricité produite à partir des énergies alternatives trouve davantage sa justification si l'on considère, comme en Allemagne du Nord ou en Italie du Sud, que les investissements sont déjà faits, qu'ils constituent des coûts échoués et que seuls les coûts marginaux à court terme sont à prendre en compte. Mais une telle situation est la résultante de surin-

vestissements faits sans s'être assuré du débouché local des productions. Il faut bien évidemment se garder d'assimiler les coûts de développement à un coût marginal à court terme sauf à prendre le risque de s'engager dans des politiques structurellement déficitaires⁴.

Le stockage peut rendre des services

Puisque le stockage a un coût, il faut que ce coût puisse être couvert par la rémunération de services rendus par ce stockage. Il se pose donc un problème d'identification des besoins, de valorisation des services apportés par le stockage pour répondre à ces besoins et de comparaison avec les coûts des différentes technologies auxquelles il peut être fait appel. Il s'agit d'un problème complexe, parce que les besoins sont évolutifs et parce que les technologies le sont également. Le présent dossier a pour objectif d'apporter des éléments de réponse à ces questions, en complément de celles que le lecteur pourra trouver en provenance d'autres sources et en particulier sur le site internet de la Commission de Régulation de l'Énergie⁵.

Du côté des besoins, on notera que l'utilité d'un stockage de l'électricité n'est pas nouvelle. Voilà bien longtemps que l'on retient en hiver l'eau des barrages pour la relâcher en été. Plus récemment, ont été construites des stations de transfert d'énergie par pompage-turbinage (STEP) qui constituent, et de très loin, la forme de stockage de l'électricité la plus répandue dans le monde. Apparues en Suisse vers 1890, elles représentent dans le monde une puissance installée de 140 GW dont environ 5 GW en France. C'est une solution éprouvée, bien adaptée au lissage des pointes à grande échelle : transfert de production des heures creuses vers les heures pleines, compensation des insuffisances d'apport en provenance des énergies alternatives. Les sites restant à équiper sont en France peu nombreux mais ce sont plutôt des considérations économiques qui freinent aujourd'hui le lancement de nouveaux projets.

Une autre forme de stockage totalement mature est constituée par des chauffe-eau électriques à accumulation télécommandés fonctionnant la nuit en heures creuses : il s'agit d'une forme hybride, puisque l'énergie est restituée sous forme d'eau chaude sanitaire. Mais elle permet de déplacer vers les heures creuses plusieurs TWh de consommation d'électricité qui a défaut viendraient s'imputer sur les heures pleines. La puissance mobilisable est équivalente à celle des STEP installés. Mais l'approche est ici locale au lieu d'être centralisée. Il est à noter que l'avenir de ces cumu-

¹ Voir l'article des Echos du 20 juin 2013, « Le stockage de l'électricité, priorité stratégique de Berlin ».

² Voir le Flash Info sur le "Power to Gas" paru dans la REE 2012-5.

³ Il faut évidemment relever les exceptions de la géothermie et de l'énergie thermique des mers, mais ces formes d'énergie restent aujourd'hui marginales.

⁴ On retrouve là, sous une autre forme, le paradoxe du voyageur de Calais décrit par Maurice Allais, selon lequel le dernier voyageur entrant à Calais dans le train de Paris n'a pas à payer son billet puisque de toute façon le train partira, avec ou sans lui.

⁵ Commission de Régulation de l'Énergie : www.cre.fr

lus est menacé du fait de la réglementation thermique des logements RT2012 et des réglementations européennes à l'étude sur la rénovation thermique de l'habitat. Ces réglementations s'appuient sur le concept formel d'énergie primaire et ignorent par conséquent la notion de stockage et de valeur différenciée du kWh selon les périodes⁶.

Si les services rendus par les stockages ne sont pas nouveaux, l'évolution des modes de production, de distribution et de consommation de l'électricité tend à en accroître la diversité. Le véhicule électrique par exemple introduit une composante nouvelle avec des stockages nomades embarqués dans chaque véhicule qui, pour un parc de deux millions de véhicules (objectif gouvernemental à horizon 2020), représenteront une puissance installée de 7 000 MW, sensiblement supérieure à celle de tous les STEP en service en France. La problématique de l'insertion des énergies intermittentes introduit une autre dimension et on comprend bien que le stockage de l'électricité apparaisse aujourd'hui comme l'une des variables de contrôle sur laquelle il sera possible de jouer dans le cadre de l'exploitation des smart grids.

Plusieurs typologies de services rendus par le stockage ont été proposées. Nous pensons qu'il y a trois grands types d'applications :

- le lissage ;
- le secours ;
- la qualité de la fourniture.

Le « lissage » est une notion très générale. Elle se décline selon deux grandes directions :

- le lissage dans le temps ;
- le lissage dans l'espace.

Le lissage dans le temps vise à permettre à la production de répondre en permanence à la demande, sans avoir à mettre en œuvre des moyens de pointe onéreux et fortement dissipateurs en CO₂. Il peut prendre différentes formes :

- transfert de production des heures creuses vers les heures pleines ;
- compensation de l'évanouissement des productions intermittentes ;
- réduction de l'appel de charge en heures pleines par report des consommations vers les heures creuses.

En outre ce lissage dans le temps peut être à dominante « énergie » ou à dominante « puissance » ou une combinaison des deux. Le besoin peut en être récurrent ou exceptionnel.

Le lissage dans l'espace vise à éviter d'avoir à transporter l'énergie électrique pour pallier la non concordance géographique entre les lieux de production et de consommation. Le bénéfice recherché est alors l'économie dans les infrastructures et les coûts de transport et de distribution mais aussi

la sécurisation du réseau, sachant que la construction de nouvelles lignes pose des problèmes de compatibilité environnementale et d'acceptabilité par les populations de plus en plus aigus. Cet aspect du lissage prend une importance croissante du fait notamment du développement des énergies décentralisées. Il conduit naturellement vers la notion de zones d'équilibre, les réseaux d'interconnexion venant alors en appui à une certaine autosuffisance locale. A un niveau de granularité encore plus fin, il conduit à encourager l'autoconsommation sur laquelle nous reviendrons plus loin.

Le lissage relève de l'exploitation normale des réseaux. La fonctionnalité « secours » vise à permettre de faire face à des situations exceptionnelles résultant notamment de la défaillance de certains composants. L'existence de moyens de secours permet de disposer du temps nécessaire pour réagir face à une telle défaillance en évitant au maximum les délestages. Les moyens de stockage peuvent être implantés à différents niveaux de la chaîne électrique : ils seront massifs s'il s'agit de sécuriser l'alimentation de presque tous les électriques, ils seront répartis s'il s'agit de sécuriser l'alimentation de clients finaux.

La fonctionnalité « qualité » se recoupe avec la précédente dans la mesure où les coupures sont les facteurs premiers de non qualité. Mais la qualité du courant s'apprécie également au travers de la stabilité de la tension et de la fréquence, des microcoupures et des harmoniques injectées sur le réseau. On comprend que le développement intensif des énergies décentralisées, associées à des systèmes d'électronique de puissance qui engendrent une certaine pollution du réseau, soit à l'origine de préoccupations croissantes. Les limites de responsabilité entre fournisseur et utilisateur sont établies par l'arrêté technique en ce qui concerne tension, fréquence et microcoupures. Elles sont moins nettes lorsque l'on parle d'harmoniques. Quoi qu'il en soit, le stockage, sous forme de batteries ou de piles à combustible insérées dans des unités « ininterrompibles » (UPS), peut constituer une réponse à ce problème d'importance primordiale pour des industries de pointe.

Une diversité de solutions

Face à cette diversité de besoins, il existe une diversité de solutions. Elles sont décrites dans le dossier ci-joint et viennent démentir le vieil adage selon lequel l'électricité ne se stocke pas. La panoplie des solutions inclut les stations de pompage/turbinage (STEP), les stockages thermodynamiques (CAES à air comprimé et systèmes dérivés), les batteries, les super-condensateurs, les piles à combustible rechargeables, les bobines supraconductrices (SMES), les volants d'inertie, etc. sans oublier les modes de stockage indirects et hybrides : chauffe-eau à accumulation et autres stockages thermiques, hydrogène, lingots d'aluminium ou autres produits finis ou semi-finis.

⁶ Le lecteur pourra se référer sur ce thème aux « Libres propos » de Jean Bergougnoux parus dans la REE 2013-2.

Une analyse technico-économique est primordiale

Le choix de la bonne solution face à un besoin reconnu de stockage ne peut résulter que d'une analyse précise de ce besoin et en particulier de la fréquence à laquelle le stockage devra être utilisé. Le surcoût introduit par le stockage dans le prix de revient du kWh restitué dépend fortement du nombre de cycles sur lesquels pourra être amorti l'investissement. Ce nombre de cycles dépend du besoin mais aussi de la durée de vie du mode de stockage⁷. Les modes de stockage traditionnels restent à cet égard privilégiés par rapport aux solutions émergentes.

D'une façon générale, eu égard à l'état de la technique et aux besoins tels qu'ils sont aujourd'hui perçus, il nous semble qu'il y a trois catégories de couples besoins-solutions qui se dessinent :

- les stockages « traditionnels », du type STEP ou CAES⁸, pour lesquels il est difficile d'imaginer des percées technologiques majeures. Ces modes de stockage ont un marché établi. On pourrait penser que celui-ci irait en s'élargissant du fait du développement des énergies alternatives. Il en va actuellement tout autrement car le développement des apports photovoltaïques pendant la journée tend à réduire l'écart de valorisation entre heures pleines de jour et heures creuses de nuit ;
- les stockages de « secours » et de « soutien à la qualité » qui peuvent s'accommoder d'un surcoût du kWh élevé et pourront donc accepter des solutions locales onéreuses mais à dynamique élevée (batteries, SMES, piles à combustible rechargeables, volants d'inertie) ;
- entre les deux une nouvelle génération d'application qui bénéficiera des progrès encore attendus sur les batteries Li-ion, progrès techniques et économiques liés au développement du véhicule électrique, mais aussi sur les batteries à sel fondu (NaS notamment). Une évolution du type « panneaux photovoltaïques » est probable compte tenu de l'accroissement de la demande et de la pléthore de fabricants dans le monde⁹. Cette « démocratisation » des

⁷ Laquelle dépend, pour les batteries, de la profondeur des déstockages.

⁸ La filière STEP semble économiquement la plus efficace et est préférée en France par EDF et ses filiales. Toutefois, certains considèrent que le choix entre STEP et CAES relève de la culture d'entreprise.

⁹ Ce qui représente un challenge considérable pour l'industrie française, comme souligné dans le dossier de la REE 2013-1 consacré au véhicule électrique.

batteries, couplée à des progrès constants sur l'électronique de puissance, ouvre la voie à des applications très diverses, en règle générale décentralisées, qui permettront sur le plan technique d'accueillir plus facilement les énergies renouvelables et d'éviter d'avoir à transporter le courant sur de longues distances.

Il faut ajouter à ces trois axes de développement celui des systèmes électriques isolés ou faiblement connectés qui intéressent au premier chef les composantes insulaires du réseau français. Un article spécifique leur est consacré. Le prix très élevé de production du kWh dans ces territoires facilite l'éclosion de technologies innovantes qui pourront ensuite être transférées sur le territoire métropolitain.

Il faut toutefois raison garder et ne pas voir dans le stockage une potion magique ou une corne d'abondance. A titre d'exemple, on peut se référer au cas des éoliennes "2.5-120 Brilliant turbines storage ready" dont la commercialisation a été annoncée en mai 2013 par General Electric et dont trois pilotes ont été vendus à Invenergy (Mills County – Texas). Ces éoliennes sont équipées de batteries à sel fondu Durathon, Na-NaCl₂, réputées avoir une durée de vie de 20 ans. Chacune est reliée à un réseau Internet industriel (du type Internet des objets) qui permet d'assurer leur pilotage à distance. Peu d'éléments technico-économiques sont disponibles sur cette approche a priori séduisante qui permet de lisser la production des éoliennes. Toutefois, un calcul rapide, admettant un investissement de 300 €/kWh, ce qui est très optimiste, et une durée de vie de 4 000 cycles, répartis par

exemple sur 20 ans, conduit à un surcoût du MWh restitué d'au moins 75 €/MWh, c'est-à-dire au doublement du coût de production. L'investissement initial dépend quant à lui de la capacité donnée au stockage mais peut également rapidement conduire à un doublement du prix de l'éolienne. On comprend mieux les réserves formulées au début de cet article et dans l'article d'Olivier Grabette de RTE sur le stockage en tant que solution miracle à l'intermittence.

Changer le modèle d'affaires

Les travaux de recherche-développement sur le stockage doivent être poursuivis en parallèle à ceux sur les moyens de production alternatifs afin que le couplage de l'un avec l'autre conduise à des solutions économiquement viables. Mais en parallèle, il faut repenser le modèle d'affaires du stockage qui ne peut pas se développer dans le cadre législatif et réglementaire actuel. Celui-ci est en effet essentiellement

Jean-Pierre Hauet est ancien élève de l'Ecole Polytechnique et Ingénieur du corps des mines. Il a occupé différentes positions dans l'Administration, en particulier celle de rapporteur général de la Commission de l'Energie du Plan. Il a dirigé le centre de recherches de Marcoussis d'Alcatel avant d'être nommé directeur Produits et Techniques de Cégélec puis Chief Technology Officer d'ALSTOM. Depuis 2003, il est Associate Partner de KB Intelligence, spécialisé dans les questions d'énergie, d'automatismes industriels et de développement durable. Il préside l'ISA-France, section française de l'ISA (Instrumentation, Systems & Automation Society). Il est membre émérite de la SEE et membre du comité de rédaction de la REE.

axé sur la rémunération de l'énergie, livrée ou fournie, sans que soient convenablement rémunérés les services associés au stockage ni même que soient structurellement intéressés les opérateurs à son développement. Le tarif de rachat de l'électricité en provenance des énergies alternatives, indépendant de la période et des besoins à satisfaire, en est une illustration. Le stockage et l'autoconsommation n'ont aucune chance de se développer dans un tel contexte. Un producteur d'énergie alternative a toujours intérêt à vendre son courant à EDF, même si ce dernier n'en a pas besoin, et

à le racheter éventuellement en tant que consommateur à un prix inférieur, plutôt que de le stocker en supportant les coûts correspondants. L'ouverture des marchés de capacité en 2015 apportera une réponse à certaines préoccupations mais pas à toutes.

Le degré de maturité atteint à la fois par les énergies alternatives et les systèmes de stockage justifie que soient remis à plat un certain nombre de principes et que des fournitures viennent accompagner une juste rémunération du stockage de l'électricité. ■



Figure 1 : Aménagement d'une STEP entre deux barrages de retenue dans le canton suisse du valais. Crédit photo : Nant de drance 2013.