



Electricité éolienne : C'est maintenant, pas après demain, qu'il faut la stocker!

Hervé Nifenecker et Jean Pierre Le Gorgeu

Résumé

Le lissage de la production d'électricité éolienne est une nécessité absolue pour tout scénario énergétique dans lequel cette électricité représenterait plus de 30% de la consommation. Des trois types de stockage habituellement proposés, batteries, STEPs et transformations électricité-gaz puis gaz-électricité, seul le troisième est envisageable à court ou moyen terme. Nous étudions particulièrement le cas de la Bretagne et proposons de réaliser un démonstrateur de lissage de la production éolienne bretonne. Il est clair, qu'à cette échelle pourtant limitée, les problèmes posés par la tenue des électrolyseurs aux variations du courant éolien, la manipulation et le stockage de millions de m³ d'hydrogène, la collecte de millions de m³ de CO₂ nécessaire si, comme le propose l'ADEME, on envisage d'utiliser la réaction de Sabatier, ne sauraient être considérés comme réglés comme le sous-entend indument cet organisme. Il est urgent de réaliser un démonstrateur d'une puissance de plusieurs centaines de MW comme suggéré ici. Dans l'attente de démonstration du fonctionnement satisfaisant et à un coût acceptable de ce démonstrateur, il n'est pas raisonnable de poursuivre la construction de nouvelles éoliennes en France continentale. En effet la multiplication des éoliennes ne réduit pas les émissions de CO₂, renchérit fortement le coût de l'électricité (par la CSPE et la perturbation du marché) et met en danger la stabilité du réseau, sans profiter à l'industrie française puisque la plupart des éoliennes sont importées.

Introduction

Que les éoliennes ne produisent pas de courant en absence de vent et que les cellules photovoltaïques n'en produisent pas en absence de soleil, presque tous les Français de bon sens le savent. Mais ce n'est le cas, semble-t-il, ni des rédacteurs de la Loi de Transition Energétique pour une Croissance Verte, ni de ceux qui l'ont votée. Ils ont, en effet, décidé de remplacer environ la moitié de la production nucléaire par une production d'électricité éolienne ou solaire aléatoire et fantasque. Sans doute ont-ils été abusés par les vendeurs de vent qui leur affirmaient qu'il y avait toujours du vent quelque part (le fameux « foisonnement ») et qu'il suffisait d'ajouter des lignes de haute tension, naguère vouées aux gémonies, aux éoliennes pour régler le problème. Malheureusement, les Français ont découvert que ce n'est pas parce qu'il n'y a pas de vent à Marseille qu'il y en a à Lille¹....Alors, les vendeurs de vent vinrent leur expliquer que la solution était de stocker l'électricité et de rédiger à l'appui de cette thèse des tonnes de rapports. Pour le député ou le journaliste moyen, pas moyen de résister à ces montagnes de papier, à ces escouades de scénarios tous plus mirifiques les uns que les autres tels ceux imaginés par Négawatt et l'ADEME. Ainsi l'ADEME prévoit-elle une puissance de stockage inter-saisonnier de plus de 17 GigaWatts (le quart de la puissance du parc nucléaire), sans pouvoir, malheureusement, s'appuyer sur une seule réalisation concrète². Cette Institution prend, d'ailleurs, une attitude irresponsable en assurant aux décideurs politiques que le stockage inter-saisonnier était une technique bien au point et évaluée

¹ Remarquons que l'ADEME et Négawatt qui s'appuient sur un développement considérable des réseaux pour jouer sur le foisonnement et sur un hypothétique stockage massif prônent en même temps l'autonomie énergétique. Allez comprendre...

² Il faut noter, toutefois, que l'ADEME, prise sans doute d'un remords tardif, se félicite du **projet** Jupiter piloté par GRTgaz qui consiste à réaliser une expérience alliant production d'hydrogène, récupération de CO₂ à partir des fumées industrielles, méthanation et injection dans le réseau de gaz. La puissance de ce dispositif serait de 1 MW. Ceci démontre à quel point le scénario d'un mix électrique « 100% renouvelable » repose sur du rêve alors qu'il a été pris pour argent comptant par les médias et de nombreux politiques. L'ADEME aurait dû, au moins, proposer un moratoire sur la construction de nouvelles éoliennes en attendant les résultats de cette expérience

économiquement³. En l'absence d'un tel stockage, la poursuite du programme de construction d'éoliennes n'a aucun sens et constitue un scandaleux gâchis financier. Il est donc urgent, tout en décidant d'un moratoire sur la construction de nouvelles éoliennes, d'entreprendre la réalisation d'un prototype de stockage de la production éolienne. Ce prototype comportera obligatoirement une étape d'électrolyse de l'eau. Nous avons pensé utile de remédier ici à l'absence de proposition concrète de stockage à l'échelle proposée par l'ADEME. Notre étude est le prolongement logique de celles montrant que le stockage est une nécessité absolue si on désire remplacer la production nucléaire par des productions renouvelables intermittentes⁴.

Un exemple Breton

La Bretagne pourrait être l'endroit idéal pour construire et mettre en œuvre un démonstrateur de stockage saisonnier. En effet, elle est bien dotée en éolien⁵ mais demeure, globalement, largement déficitaire pour sa production d'électricité. Comme on le voit sur la Table 1, la puissance éolienne bretonne installée dépasse légèrement 800 MW, mais la puissance effective varie constamment, comme le montre l'exemple de la Figure 1 ou elle fluctue entre 10 et 700 MW pour une valeur moyenne de 336 MW. La Figure 1 montre l'effet d'un lissage sur 125, 250 et 500 h de la production éolienne. La Table 2 donne les valeurs maximum et minimum de la puissance éolienne pendant la période du 6 au 24 décembre 2015, avec et sans lissage. La dernière colonne du tableau exprime la puissance minimum en pourcentage de la puissance maximum. On voit que le lissage permet de passer d'un creux de 1,3% en absence de lissage à plus de 40% pour une durée de lissage de 500 h. Cette valeur nous semble un compromis raisonnable, compte tenu des possibilités de pilotage de la demande et des grandes constantes de temps de variation de la production. Dans ces conditions les caractéristiques d'un stockage adapté à la production éolienne bretonne seraient une puissance de 700 MW⁶ et une énergie stockée de 168 GWh⁷.

	Puissance	Energie	Facteur de charge %
	MW	GWh	
consommation		21211	
production		3100	
Importation		18111	
hydroélectricité	276 (Rance 240)	585 (Rance 518)	24
éolien	816	1396 ⁸	19
PV	167	177	12

Table 1
Caractéristiques du système électrique breton en 2014 [Chiffres clés 2015 WEB.pdf](#)

³ Sans de telles assurances émanant d'un organisme d'Etat les programmes énergétiques des candidats Jean Luc Mélenchon, Benoît Hamon et, à un degré moindre Emmanuel Macron visant à une sortie totale ou partielle du nucléaire perdent toute crédibilité

⁴ <http://www.sauvonsleclimat.org/enri-priorite-stockage-2/>
http://www.sauvonsleclimat.org/le-photovoltaïque-peut-il-remplacer-le_nucleaire/
<http://www.sauvonsleclimat.org/le-vent-ou-le-nucleaire/>

⁵ Selon l'ADEME la Bretagne et l'Aquitaine sont les régions ayant le plus fort potentiel éolien

⁶ Cette puissance est légèrement inférieure à la puissance du parc éolien, car un écrêtage à 70% de la puissance nominale permet déjà de stocker 90% de la production.

⁷ 336 MW pendant 500 heures soit 168 GWh ou $6 \cdot 10^5$ GJ (milliards de Joules)

⁸ La valeur de la puissance moyennée sur l'année est de 159 MW, bien inférieure à la valeur de 336 MW obtenue d'après la Figure 1 pour la période du 6 au 24 décembre. Cette différence est le résultat d'un régime de vent qui est beaucoup plus favorable en décembre que pour l'ensemble de l'année. Le stockage doit être dimensionné pour le régime le plus favorable

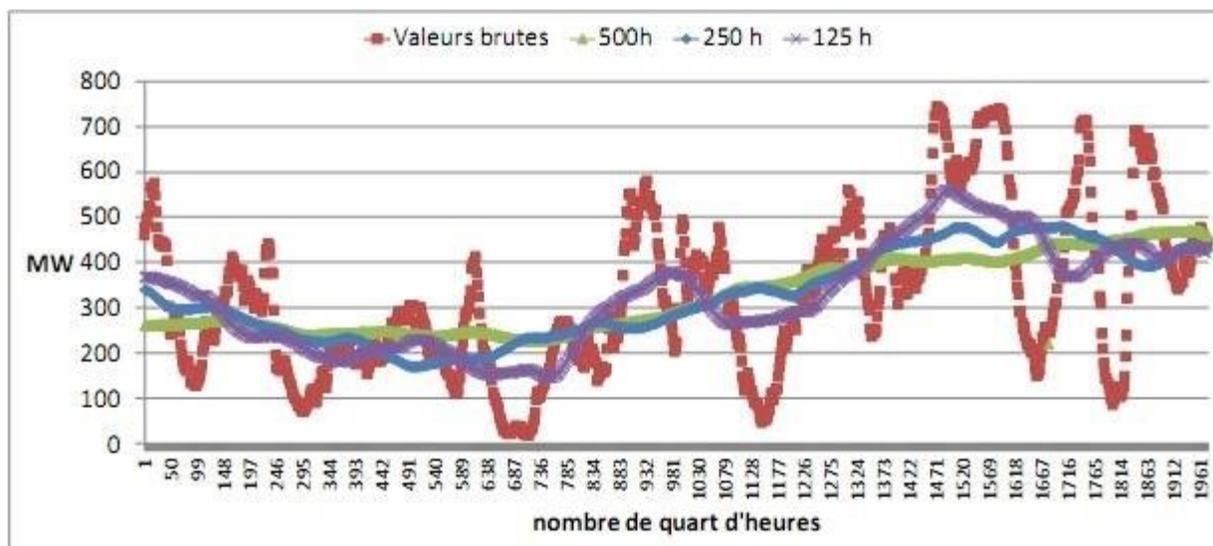


Figure 1

Puissance électrique produite par les éoliennes bretonnes du 6 au 24 Décembre 2015.

Effet d'un lissage sur 125, 250 et 500 h.

Les valeurs lissées correspondent à une sommation normalisée des valeurs brutes sur 250, 125 ou 72,5 heures de part et d'autres de la valeur lissée⁹. [eCO2mix RTE Bretagne Annuel-Definitif 2015.zip](#)

Durée du lissage h	Puissance mini MW	Puissance max MW	Puissance garantie mini/max %
Sans lissage	10	742	1,3
125 h	146	560	26
250 h	170	478	36
500 h	219	471	46

Table 2

Évolution des caractéristiques de la production éolienne en fonction de la constante de temps de lissage

Stockage par batteries

On peut espérer un coût du stockage par batteries Li-Ion (qui ont le mérite de ne se décharger spontanément que très lentement) de 220 €/kWh à l'horizon 2020¹⁰. Le coût du stockage envisagé de 168 GWh s'élèverait donc à 37 milliards d'euros, ce qui est exorbitant. Le stockage journalier par batterie est, en revanche, bien adapté à la production photovoltaïque et devrait être obligatoire pour l'obtention d'un soutien sous quelle que forme que ce soit, obligation d'achat, complément de rémunération ou autre subvention déguisée.

⁹ Le processus de stockage/déstockage entraîne une intégration du courant stocké sur la durée de stockage T, et, aussi, un retard au déstockage de T/2. Notre méthode permet de s'affranchir de ce décalage pour pouvoir comparer facilement les résultats pour diverses valeurs de T

¹⁰ The rechargeable Battery Market and main trends 2014-2015 by Christophe Pillot, AVICENNE ENERGY

Stockage par STEP¹¹

Une petite STEP a été proposée par la SAS TRI'NERZH sur le site d'une ancienne carrière à Berrien (Finistère). Elle aurait une puissance de pompage, fournie par de l'éolien et du photovoltaïque, de 2,5 MW et une puissance de turbinage de 1,5 MW. Cette STEP, fonctionnant sur la base d'un turbinage quotidien pendant 11h, on peut en déduire que l'énergie stockée sera de l'ordre de 17 MWh, soit un dix millième de ce qui serait nécessaire à l'échelle de la Bretagne.

Dimension d'un stockage par STEP marines

Il est aussi possible d'envisager d'équiper les côtes bretonnes de STEP marines¹².

Nous supposons que le réservoir haut est compris entre 15 et 25 m au-dessus du niveau de la mer, soit une hauteur moyenne de chute de 20 m et une profondeur de la réserve de 10 m. Pour stocker 168 GWh le réservoir doit avoir une surface de 300 km². En retenant une largeur du réservoir de 100 m, on obtient un linéaire de 3000 km alors que le linéaire de la côte bretonne ne dépasse pas 2200 km..... Un projet de pompage d'eau de mer a été étudié près de la commune de Plouha (22) dotée d'une falaise de 100 m de hauteur, avec la création de lacs d'eau de mer dans la campagne avoisinante. ¹³ Difficile d'imaginer les Bretons accepter une telle défiguration de leurs côtes !

Production d'hydrogène

Pour les quantités à stocker excédant les capacités des STEPs la transformation de la puissance électrique en gaz combustible (Power to Gas) suivie par le processus inverse de combustion du gaz dans une turbine à gaz ou une pile à combustible (Gas to Power) est généralement proposée, par exemple par l'ADEME. La première étape consiste à produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. L'énergie nécessaire pour produire 1 kg d'hydrogène est égale à 33 kWh. En supposant une efficacité d'électrolyse de 70%, on voit que les 168 GWh à stocker permettraient de produire 3675 tonnes d'hydrogène (41 millions de Nm³). Il existe des stockages souterrains de gaz naturel dans des nappes aquifères ou des cavités salines, dont les capacités dépassent les 100 millions de tonnes¹⁴. Il ne semble pas exister de telles opportunités en Bretagne et la possibilité de stocker l'hydrogène en quantité suffisante reste à démontrer¹⁵. La mobilité de l'hydrogène risque d'être un sérieux obstacle pour le stocker à l'image du gaz naturel. C'est probablement la raison pour laquelle l'ADEME et Négawatt se replient sur la réaction dite de Sabatier qui permet, en utilisant une réaction faiblement exothermique, de produire du méthane à partir de gaz carbonique et d'hydrogène¹⁶. Encore faut-il trouver environ 10 millions de m³ de CO₂, correspondant à la combustion de 5000 tonnes de Carbone organique¹⁷ ou prélevés directement dans l'atmosphère (par quelle méthode ?)¹⁸. La solution d'une injection du méthane résultant de la réaction de Sabatier dans le réseau de gaz naturel est, à l'évidence, le moyen rêvé de « verdir » ce dernier puisque, une

¹¹ Stockage d'Énergie par Pompage Turbinage. Rappelons que 1 kg d'eau tombant de 1 m fournit 9,81 Joule, et que la puissance de 1 Watt vaut 1 Joule/s.

¹² Une STEP consiste à disposer de deux réservoirs d'eau, un bas et l'autre haut. Lors d'un afflux d'énergie le surcroît d'énergie permet de pomper l'eau du réservoir bas vers le réservoir haut. Puis lorsque la demande d'énergie excède l'offre, on laisse tomber l'eau du réservoir haut vers le bas en utilisant l'énergie de la chute d'eau pour entraîner des turbines produisant de l'électricité. La proposition de François Lempérière consiste à utiliser l'océan comme réservoir bas et un lac artificiel comme réservoir haut. L'énergie stockée dans le réservoir haut vaut MgH où $g=9,81$ m/s/s, H la hauteur de la chute en mètres, et M la masse du réservoir haut (en kg) susceptible d'être vidée dans le réservoir bas.

¹³ Exposé de Jean-Yves DELACOUX, ancien Directeur Délégué pour l'Hydraulique, EDF : Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP). Université d'été de « Sauvons le climat » Landéda 14-15 septembre 2012

¹⁴ https://fr.wikipedia.org/wiki/Stockage_du_p%C3%A9trole_et_du_gaz

¹⁵ <http://www.ineris.fr/centredoc/stockage-souterrain-hydrog%C3%A8ne-1453190900.pdf>

¹⁶ La réaction de Sabatier s'écrit $CO_2+4H_2\rightarrow CH_4+2H_2O$

¹⁷ Qui pourraient venir du lisier de porc

¹⁸ Le CO₂ qui pourrait être capturé dans les fumées de centrales électriques utilisant des combustibles fossiles ôterait le caractère renouvelable à l'électricité produite après stockage.

fois injecté dans le réseau il n'y a aucun moyen de distinguer le gaz provenant des gisements russes ou des terminaux gaziers de celui produit grâce aux énergies renouvelables¹⁹

. Pour assurer la transparence de la démonstration Il faut donc que la production d'électricité se fasse dès la sortie du stockage de démonstration, et non en recourant au réseau de gaz.

L'ADEME estime un rendement global de 33% pour le procédé « *Power to Gas* », « *Gas to Power* » complet pour un coût de 138 €/MWh. En retenant un coût de 60 €/MWh du courant éolien avant stockage, comme le fait l'ADEME, on obtient un coût total du courant lissé de 318 (138+3*60) €/MWh.

Une proposition de stockage

Dans la pratique, de ce qui précède, la seule méthode de stockage sérieusement envisageable du courant produit par les éoliennes est celle qui consiste à produire de l'hydrogène. Les principaux problèmes techniques résident dans le stockage de l'hydrogène et dans le comportement des électrolyseurs de puissance alimentés par des courants fortement variables. Le site de la centrale nucléaire de Brennilis pourrait être utilisé pour y installer les bancs d'électrolyse, d'autant plus qu'EDF, par sa filiale RTE, devrait être directement intéressée à un lissage du courant produit par les éoliennes bretonnes. Un aspect favorable de la centrale de Brennilis est que deux TAC (Turbines à Combustion) de 86 MW²⁰, susceptibles de brûler de l'hydrogène ou un mélange hydrogène-méthane, sont présentes sur place. Bien entendu, les estimations de coûts faites ci-dessus ne sont que des ordres de grandeur et seule une expérimentation en vraie grandeur au niveau de quelques centaines de MW pourrait les préciser. Compte tenu du fait que le courant produit par les éoliennes est encore sous le régime de l'obligation d'achat, seul le coût du stockage doit être pris en compte dans le coût du démonstrateur. Nous ne retenons donc que le coût de 138 €/MWh²¹ estimé par l'ADEME. Selon le Tableau 1, la production d'une année de l'éolien breton est de l'ordre de 1600 GWh, conduisant à un coût de stockage d'environ 0,22 milliards d'euros par an²². Nous proposons que cette somme soit financée de la même façon que les parcs éoliens off shore²³. La maîtrise d'œuvre de cette réalisation pourrait être confiée à l'ADEME qui a fait de ce type de stockage le pilier principal sur lequel reposent ses scénarios. RTE devrait aussi être associée de très près à la réalisation de cet investissement, puisqu'il devrait en être le principal bénéficiaire du fait de l'amélioration de la stabilité du réseau.

Conclusion

Plutôt que de continuer à construire des parcs éoliens terrestres ou maritimes qui n'ont pas d'effet sur nos émissions de CO2, renchérissent significativement le prix de notre électricité, mettent en péril la stabilité du réseau, tout en exigeant le développement de ce dernier et nécessitent des moyens de production de soutien (back-up), nous préconisons de réaliser à une taille significative un démonstrateur de production et de stockage d'hydrogène associé à une production d'électricité par turbine à gaz ou pile à combustible. Ce démonstrateur permettrait de voir comment l'alimentation par de l'électricité intermittente affecte le rendement de l'électrolyse. Il pourrait être installé sur le site nucléaire de Brennilis qui est équipé pour la gestion des hautes tensions et fortes intensités associées à la production de réacteurs

¹⁹ A l'instar des électrons, qu'on ne peut affecter à une énergie renouvelable ou fossile, ou nucléaire !

²⁰ Qui ont des rendements plus faibles que les CCGG ou les PAC

²¹ Le tarif d'achat du courant EDF par ses concurrents, l'ARENH est fixé à 42 €/MWh, sûrement trop faible. Le tarif d'achat de l'éolien est fixé à 82 €/MWh. Selon la Cour des Comptes le coût du courant fourni par les réacteurs nucléaires est aux environs de 60 €/MWh.

²² Avec un taux d'actualisation de 8%, ceci correspondrait à un investissement en capital de 2,75 G€

²³ Un appel d'offres serait lancé pour la réalisation du démonstrateur avec tarif garanti aux environs de 200 €/MWh (actuellement les tarifs garantis pour l'éolien offshore se situe entre 200 et 220 €/MWh) En même temps les appels d'offres non réalisés pour les parcs offshore seraient suspendus. A noter que les appels d'offres remportés, entre autres, par EDF d'une part, ENGIE d'autre part totalisent déjà 3000 MW, à comparer aux modestes 400 MW du démonstrateur envisagé ici.

nucléaires de puissance et qui appartient à EDF. Seule la mise en œuvre d'un tel démonstrateur permettra de juger de l'utilité et de la rentabilité de la poursuite du développement de la production d'électricité éolienne.

D'une façon générale, nous considérons que les productions d'électricité par des sources renouvelables intermittentes ne sauraient être encouragées et soutenues qu'à la condition de pouvoir les adosser à un dispositif de stockage viable visant à lisser leur production.

Sauvons Le Climat appelle Madame la Ministre de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie et de la Mer à :

- suspendre les appels d'offres pour les parcs éoliens
- lancer un appel d'offres pour un démonstrateur de stockage d'électricité par la technique « Power to Gas »- « Gas to Power »
- demander à l'ADEME d'assumer le pilotage de ce projet, qui pourrait être localisé sur le site de Brennilis