

Le plus gros handicap de l'éolien : son intermittence !

Introduction : l'intermittence de l'éolien, de quoi s'agit-il ?

Chacun a pu voir en circulant en France par temps calme des éoliennes à l'arrêt, comme les tripodes des martiens morts de la Guerre des Mondes. C'est évident, par vent insuffisant, les pales ne peuvent être mises en mouvement, et l'éolienne ne produit pas d'électricité.

Mais réfléchissons au-delà de cette évidence : En réalité quel est le profil de production d'électricité d'une éolienne au cours de l'année, et ce profil correspond-il vraiment à nos besoins ?

L'électricité produite par les éoliennes est « **fatale** » (on dit aussi non-commandable, ou non-dispatchable) en ce sens qu'elle dépend d'un phénomène naturel et non de la volonté des hommes. **L'homme ne peut donc la contrôler, sinon dans le sens d'une diminution de production en bridant ou en arrêtant l'éolienne.**

N'oublions pas non plus que l'électricité est impossible à stocker en tant que telle : il faut donc la consommer au moment où elle est produite. Si nous n'en avons pas besoin au moment où elle est produite, elle est perdue. Et si elle n'est pas produite au moment où nous en avons besoin, nos besoins en électricité ne sont pas satisfaits.

Il est cependant possible de transformer l'électricité en d'autres formes d'énergie qui elles sont stockables : il s'agit pour l'essentiel, en ce qui concerne les stockages pouvant avoir des capacités importantes :

- 1- de sa **transformation en énergie hydraulique**, en faisant monter en période de basse consommation de l'eau dans des barrages, qui sera ensuite turbinée dans une usine hydroélectrique au moment des besoins. L'installation permettant la conversion de l'électricité en énergie hydraulique, puis la production d'hydroélectricité à la demande à partir de l'énergie hydraulique ainsi stockée, est appelée **Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)**.
- 2- de sa **transformation en énergie électrochimique** stockée dans des **batteries**.

Nous verrons que, malheureusement, ces moyens sont très insuffisants pour répondre à une production très importante d'électricité éolienne à l'échelle d'un pays comme le nôtre. **D'autre part, on perd ainsi dans ces transformations environ 30 % de l'électricité initialement produite !**

Pour analyser le profil de production d'une éolienne, rappelons tout d'abord que l'électricité est produite par une dynamo, celle-ci étant actionnée par la rotation des pales. Une éolienne transforme donc l'énergie mécanique du vent en électricité. La dynamo ayant été inventée à la fin du 19^{ème} siècle, cette façon de produire de l'électricité a donc été possible depuis lors. Elle n'a pour autant pas eu beaucoup de succès jusqu'à ces dernières années, sauf pour des applications de niche.

Un point fondamental à bien comprendre est que l'énergie mécanique du vent varie comme le cube de sa vitesse. Par conséquent, une division par deux de la vitesse du vent résulte en une division par $2 \times 2 \times 2 = 8$ de la production possible d'électricité !

Dans la pratique, c'est plus compliqué. Il faut une vitesse minimum du vent, 10 à 20 km/h selon les modèles d'éoliennes, pour que les pales consentent à tourner, car il faut vaincre les frottements internes de la machine. Au-delà d'environ 40 km/h, on bride progressivement l'éolienne qui autrement pourrait être détériorée. A partir d'environ 90 km/h, on arrête l'éolienne en mettant les pales en drapeau, car les probabilités de casse deviennent alors très importantes (**figure 1**).

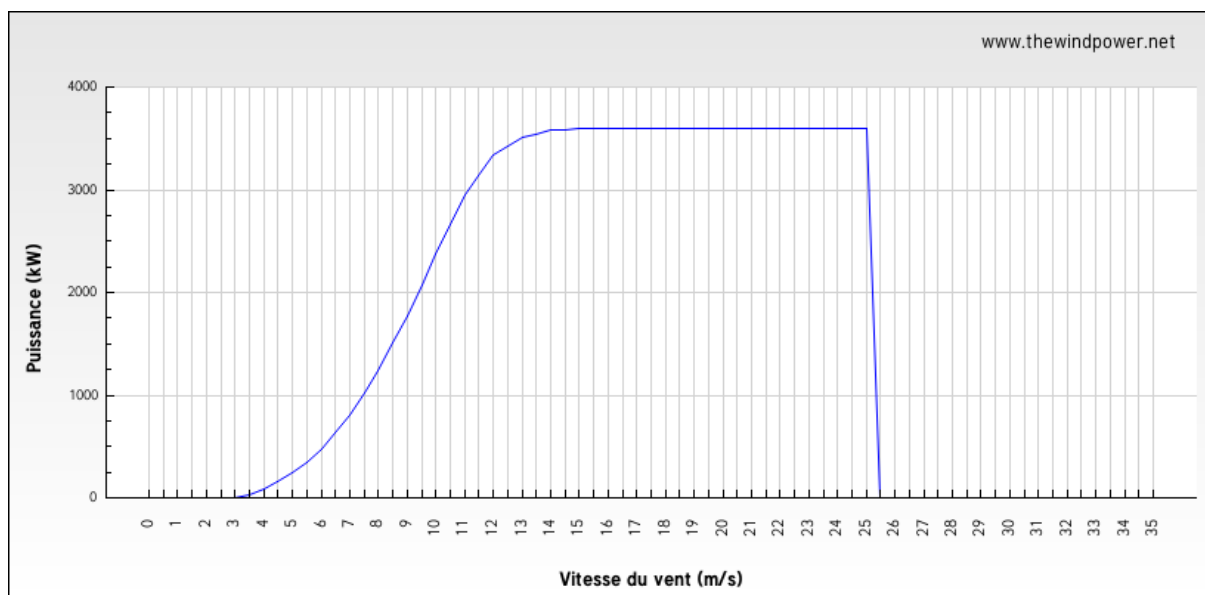
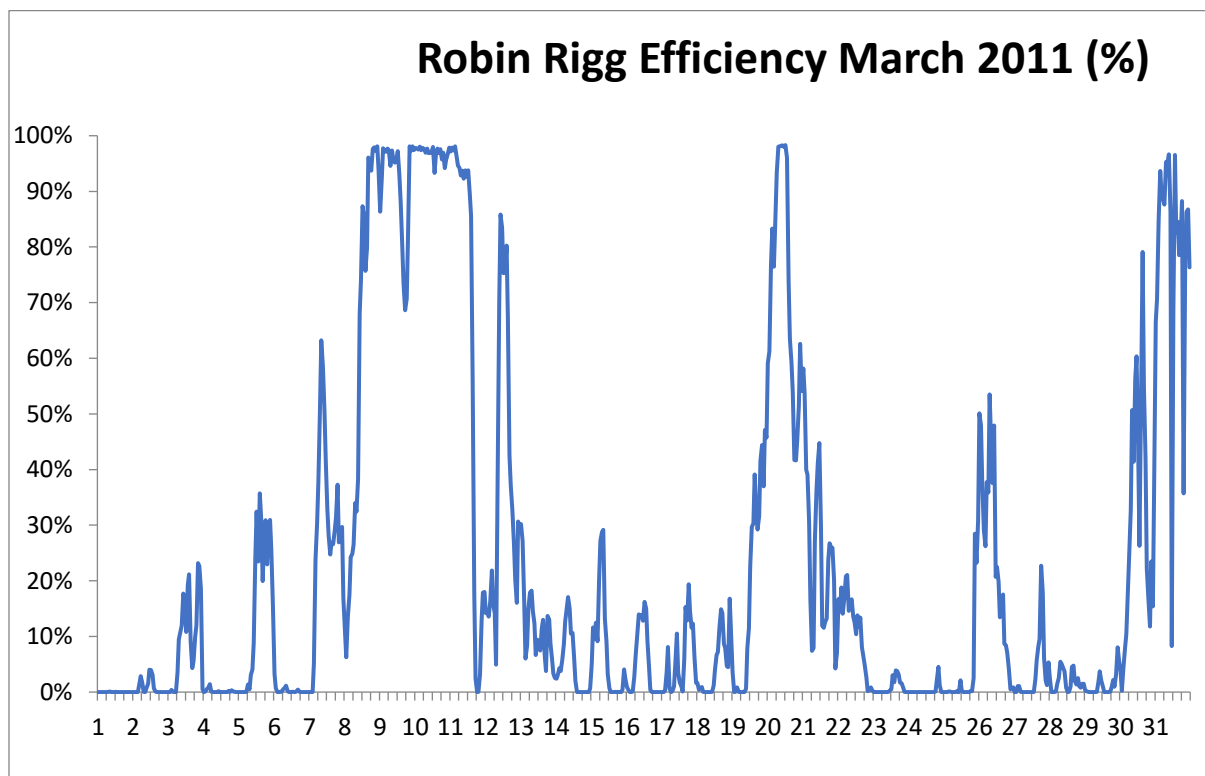


Figure 1 : profil-type de la puissance électrique délivrée par une éolienne Siemens de 3,6 MW de puissance en fonction de la vitesse du vent. Pour passer des m/s aux km/h, il faut multiplier par 3,6. Ces profils diffèrent un peu d'un type d'éolienne à l'autre, mais pas de façon fondamentalement différente. Source document Siemens.

Mais la vitesse du vent, chacun peut le constater, varie souvent et parfois très rapidement. Il en résulte des fluctuations incessantes au cours du temps de la puissance électrique réellement délivrée, dans des proportions très importantes (**figure 2**). **C'est ce phénomène qu'on appelle intermittence.**



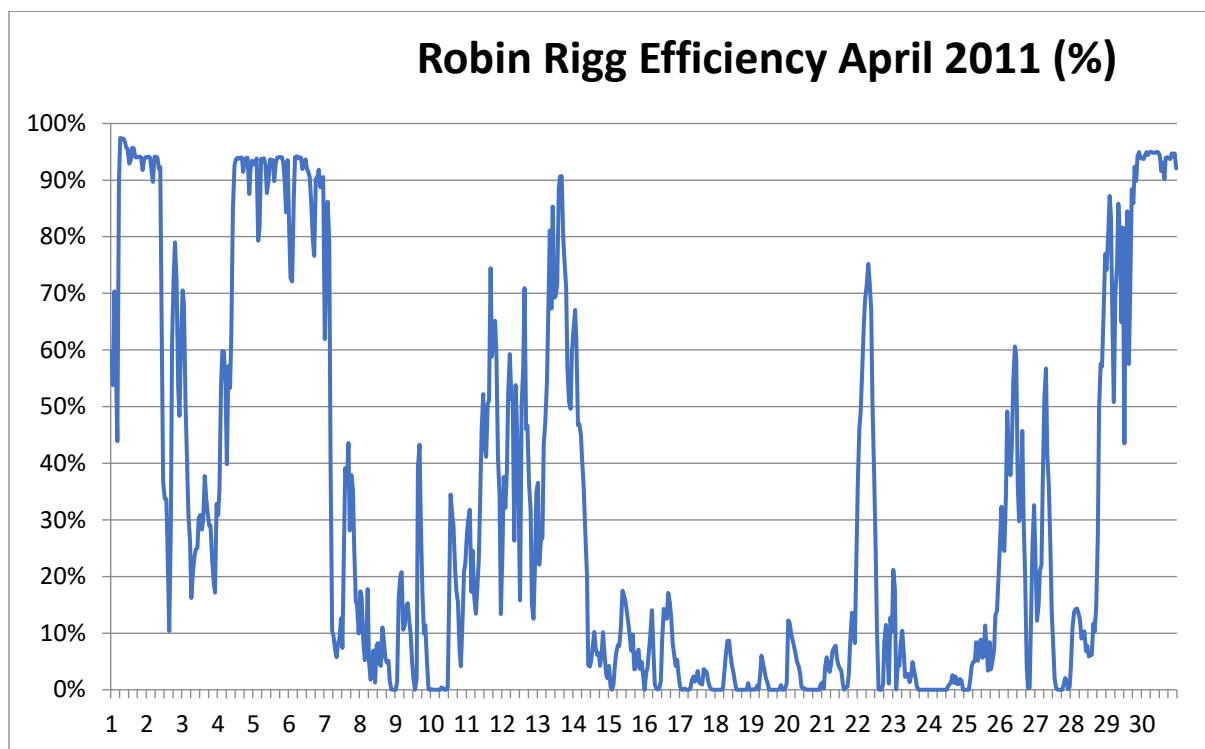


Figure 2 : fluctuations journalières de la puissance électrique délivrée par la centrale éolienne en mer de Robin Rigg en Ecosse pendant deux mois successifs, mesurées à un pas de temps d'une heure, et exprimées en % de la puissance maximale possible des éoliennes. On observe des périodes de très faible production pouvant durer une semaine, correspondant à des périodes de calme, et des périodes de très forte production correspondant à des vents très forts. Les chutes brutales de production pendant ces périodes correspondent probablement à des mises en drapeau des pales pour raisons de sécurité. Il est bien évident, et nous en discutons plus loin, que de tels profils de production ne correspondent absolument pas à un profil des besoins. Il est probable qu'une centrale éolienne en mer à Oléron aurait un profil de production de ce type. **Observons qu'il est impossible de prédire avec précision ces profils et l'intensité des fluctuations, qui varient d'un jour à l'autre, malgré les progrès de la météorologie.** Source H.Flocard.

Ces fluctuations ont comme conséquence que la quantité d'électricité délivrée par une éolienne est très inférieure à la quantité qui serait produite si l'éolienne fonctionnait en permanence à sa puissance maximale possible. Le rapport entre les deux est appelé le facteur de charge. Celui-ci varie considérablement en fonction des caractéristiques locale du vent . Calculé sur l'année, il est par exemple en moyenne d'environ de 30 % autour de Narbonne, mais seulement de 10 % autour de Toulouse.

Etant donné que la rentabilité d'une éolienne dépend étroitement de la quantité d'électricité qu'elle peut produire dans l'année, avant toute implantation sur un site les promoteurs étudient donc de très près, pendant deux ans environ, les caractéristiques du vent sur ce site, à l'aide de ce qu'on appelle un mât de mesure. En Aquitaine, ces caractéristiques sont le plus souvent défavorables, ce qui explique qu'on n'y voit pas beaucoup d'éoliennes .

La puissance électrique délivrée par une centrale éolienne varie donc sans arrêt et beaucoup, parfois très brutalement. D'autre part, il y a de nombreuses périodes dans l'année où elle ne peut produire que très peu : Ce sont les « pannes » de vent observées par exemple sur la figure 2. Ces

pannes peuvent être bien plus longues que celles montrées sur cette figure et s'étendent souvent à toute l'Europe occidentale, par exemple lors de l'installation sur celle-ci de puissants anticyclones.

L'intermittence de l'éolien, quelles conséquences ?

1-la production d'électricité délivrée en une année par une éolienne, est très inférieure à celle qu'elle pourrait produire si elle tournait régulièrement toute l'année à son maximum possible de puissance. On mesure ses performances par ce qu'on appelle son facteur de charge annuel, qui est le rapport de la quantité d'électricité réellement produite dans l'année à la quantité qui pourrait être produite si elle avait pu tourner constamment à sa puissance maximale. En France, ce facteur de charge annuel pour les éoliennes terrestres est en moyenne de l'ordre de 21 % actuellement, c'est-à-dire qu'une éolienne terrestre y produit en moyenne dans l'année une quantité d'électricité de 1,84 million de kWh (GWh) d'électricité par MW et par an, alors qu'en tournant constamment à sa puissance maximale, elle produirait 8,76 millions de kWh (GWh), l'année comprenant 8760 heures. Il devrait baisser à l'avenir, les meilleurs sites étant déjà occupés. Les éoliennes en mer ont un meilleur facteur de charge, parce que le vent y est en moyenne plus puissant et régulier qu'à terre. Mais à Oléron, la distance à la côte sera insuffisante, et le vent moins favorable qu'en Europe du Nord. Il faut s'attendre à un facteur annuel de charge au mieux de 30 % : c'est par exemple celui de la centrale de Robin Rigg (**figure 3**), au large de la côte Ouest de l'Ecosse, où le vent est pourtant meilleur qu'à Oléron. Un facteur de charge de 30 % correspond à une production de 2,6 GWh par MW et par an, mais un peu moins à l'arrivée sur le réseau, du fait des pertes de l'installation et des lignes électriques. La puissance installée prévue étant d'environ 500 MW, la quantité d'électricité réellement mise sur le réseau sera en moyenne d'environ $500 \times 2,4 \text{ GWh} = 1200 \text{ GWh}$ (1,2 TWh) par an. Elle sera variable selon les années en fonction des conditions météo.

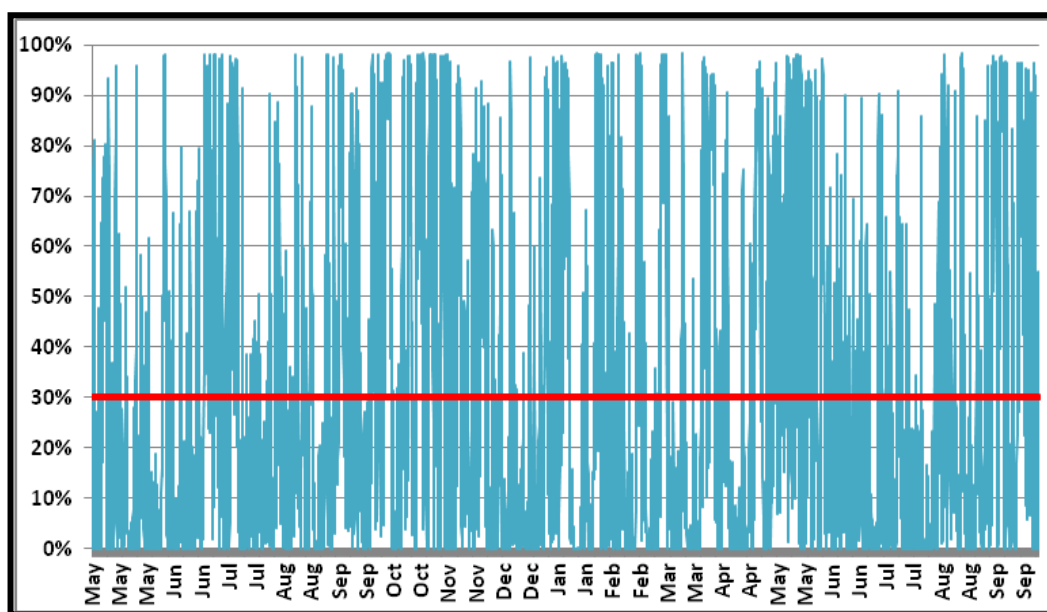


Figure 3 : fluctuations en cours d'année de la puissance électrique délivrée par la centrale de Robin Rigg en Ecosse. En rouge le facteur de charge annuel, 30 %. Source H.Flocard

Oléron, où le vent est moins favorable, devrait avoir un facteur de charge plus faible.

2-que l'essentiel de la production d'une éolienne est produite par des vents forts, supérieurs à environ 40 km/h, mais pas trop (moins de 90 km/h) pour des raisons de sécurité. Ces conditions ne sont réunies en France qu'un nombre limité de jours par an, environ 50 à 60. D'autre part, à l'échelle de l'Europe de l'Ouest, ces vents forts soufflent à peu près partout en même temps, ce qui veut dire que l'on ne peut compenser que faiblement un déficit de production dans un pays, par un excès de production dans un autre: tout le monde produit à peu près en même temps (**figure 4**), et quand il y a une période de vents trop faibles (panne de vent), en général de deux à 3 jours, mais assez souvent d'une semaine et parfois de deux à trois semaines, on l'observe aussi à peu près partout en Europe. **Le fameux slogan : « il y a toujours du vent quelque part », répété en boucle pendant des années pour convaincre les populations ébahies du miracle éolien, s'il est formellement à peu près exact, ne correspond donc pas à la réalité physique, car s'il y a très souvent un peu de vent, il n'y en a presque jamais suffisamment où et quand il le faudrait. C'est donc une imposture.**

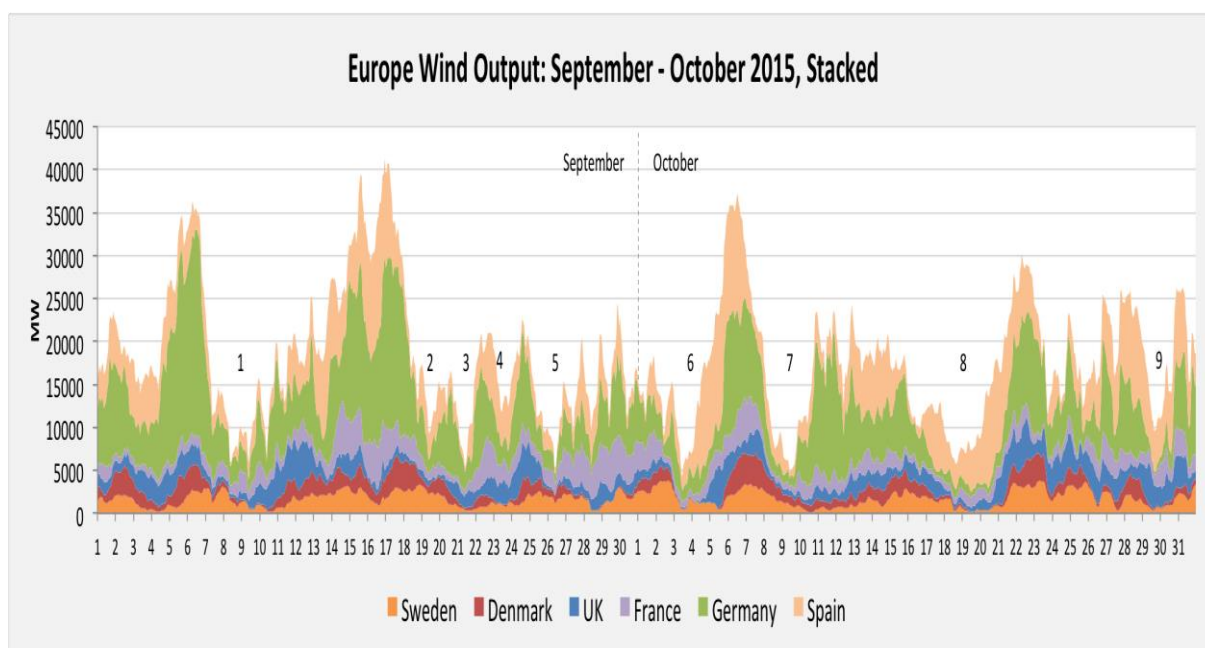


Figure 4 : Productions cumulées des éoliennes des 6 principaux producteurs européens en Septembre et Octobre 2015 : on observe quelques différences d'un pays à l'autre mais dans l'ensemble, les périodes de très forte et de très faible production se produisent en même temps, en coïncidence avec des événements météorologiques ayant lieu en même temps dans toute l'Europe. Source : Euan Mearns . Le développement de l'éolien en France ne fera qu'accentuer ces énormes contrastes de puissance. Chaque pays cherchera à se débarrasser en même temps de ses excédents momentanés, perturbant ainsi très fortement le marché de gros de l'électricité ! Les réseaux haute tension devront être développés, renforcés et sécurisés à grands frais dans toute l'Europe, du fait de l'ampleur et de la rapidité des variations de puissance ! Ce profil de production ne coïncidant pas avec la consommation (voir **figure 5), même à l'échelle européenne l'éolien ne peut absolument pas se passer de l'assistance de centrales dites de back-up, produisant à la demande pour faire l'ajustement. Ce sont pour beaucoup des centrales à combustibles fossiles polluantes, sauf, parmi les pays ci-dessus, la France et la Suède.**

En outre la faible compensation qui existe ne pourra être exploitée que si l'on sillonne l'Europe de lignes à haute tension très coûteuses entre les différents pays producteurs. Il faut aussi noter les énormes et rapides fluctuations de puissance de l'éolien à l'échelle Européenne, et leur prévisibilité insuffisante. Il faudra donc renforcer partout les réseaux électriques, y compris les réseaux moyenne

et basse tension, et disposer de capacités très importantes de **centrales conventionnelles, dites de back-up** qui devront être disponibles l'arme au pied. Tout cela a un coût élevé, qui en toute logique devrait être imputé à l'éolien.

3-que la production d'une centrale éolienne ne coïncide pratiquement jamais avec la demande d'électricité du consommateur (Figure 5). Il lui est donc parfaitement impossible, contrairement au slogan martelé sans relâche par les promoteurs, qui est donc une imposture, de fournir à elle seule la consommation électrique d'une ville de tant d'habitants. Remarquons d'ailleurs que la ville en question est purement théorique, puisqu'il n'existe aucune ville en France qui ait besoin de cette électricité. D'autre part, cette ville ne saurait que faire des excédents produits lors des jours de grand vent, et n'aurait pas d'électricité les jours sans vent ! Pour faire coïncider à chaque instant production et consommation, il faut adjoindre aux centrales éoliennes des centrales dont on peut faire varier la production électrique à la demande (centrales dites commandables ou dispatchables), appelées aussi **centrales de back-up** ; celles-ci doivent produire pour équilibrer les incessantes fluctuations de l'éolien.

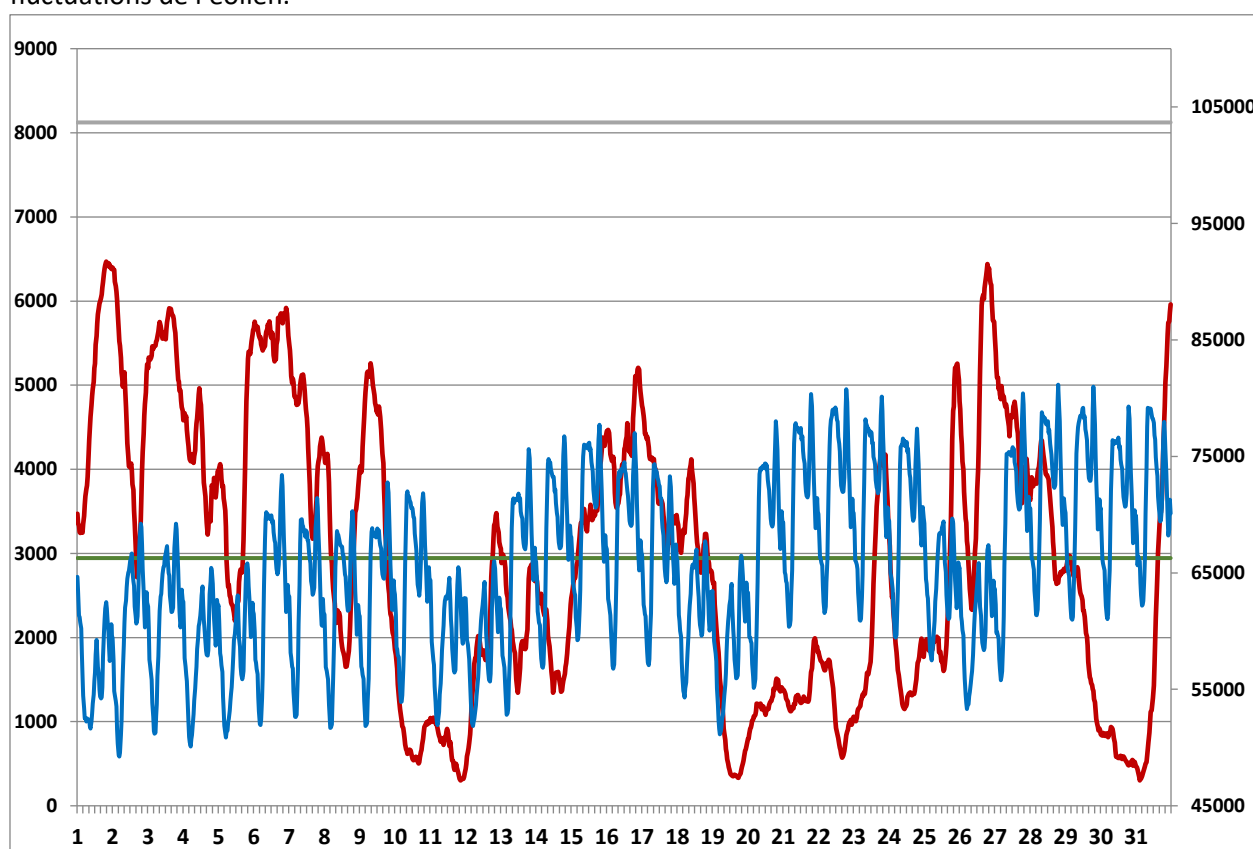


Figure 5 : Profil de la consommation française d'électricité de Janvier 2004, comparé au **profil de production des éoliennes** en ce même mois. **On a fait pour ce dernier un changement d'échelle (X 22), pour montrer les quantités d'électricité qui devraient être produites pour égaler, uniquement avec des éoliennes, la consommation totale française de ce mois là. La puissance installée devrait être d'environ $8100 \times 22 \sim 180\,000$ MW, ce qui correspond à l'installation de 60 000 éoliennes géantes de 3 MW. Les éoliennes produisant beaucoup moins en Août qu'en Janvier, c'est en fait 100 000 de ces éoliennes qu'il faudrait pour passer l'année. Mais pour pouvoir ajuster la production éolienne à la consommation, il faudrait la stocker quand elle est en excès, pour la restituer au besoin ! Or le stockage se faisant avec au minimum de 30% de pertes, c'est au minimum environ 140 000 de ces éoliennes, soit une pour 4 km² du territoire métropolitain, qu'il faudrait ! Les Français sauf dans les grandes villes seraient donc entourés d'éoliennes géantes à perte de vue. Source H.Flocard.**

Mais c'est tout à fait théorique, parce qu'on peut pas stocker de telles quantités d'électricité: il s'en faut d'au moins un facteur 100 !

Ces centrales de back-up doivent en fait pour cela produire beaucoup plus d'électricité dans l'année que les centrales éoliennes. En Allemagne, ce sont des centrales à combustibles fossiles, surtout des centrales à charbon très polluantes, qui jouent ce rôle, d'où les émissions de CO2 très élevées de la production électrique allemande et une pollution atmosphérique dangereuse, entre autres par des microparticules et des oxydes de soufre et d'azote, pollution qui se propage en France par vent de Nord-Est, fréquent en hiver (voir http://awsassets.wwfffr.panda.org/downloads/dark_cloud_full_report.pdf et <https://vimeo.com/172886975>).

En France, ce sont les centrales hydroélectriques et les centrales nucléaires qui sont surtout utilisées, d'où les émissions de CO2 extrêmement faibles du mix électrique français, et sa faible production de polluants atmosphériques dangereux.

Il est aussi très important aussi de comprendre que sur le réseau électrique européen, la fréquence du courant électrique doit être maintenue partout dans des limites étroites, entre 49,9 et 50,1 hertz, sous peine d'écrouler le réseau, c'est ce qu'on appelle un blackout, avec des conséquences qui peuvent être désastreuses pour l'Europe entière.

Or les fluctuations de la puissance électrique délivrée par une centrale éolienne sont souvent rapides et très importantes, et cela est particulièrement vrai des centrales d'éoliennes de mer, où les puissances nominales sont très importantes (500 MW dans le cas du projet d'Oléron) et pour lesquelles les variations de la puissance délivrée peuvent être encore plus rapides et importantes qu'à terre (**figure 3**). Les épisodes de mises à l'arrêt brutales pour causes de vitesses excessives du vent sont aussi plus fréquents ! De telles fluctuations de puissance s'accompagnent de fluctuations de fréquence sur le réseau qui peuvent être fatales si elles ne sont pas immédiatement contrebalancées, ce que ne peuvent faire des éoliennes qui n'ont pas l'inertie suffisante (http://www.sauvonsleclimat.org/images/articles/pdf_files/ue_2016/11-12-Sapy%20Creusot2016_stabilite-reseaux.pdf).

Ce sont les grosses centrales conventionnelles de back-up, nucléaires et à combustibles fossiles, qui, ayant l'inertie nécessaire, jouent le rôle de garde-fou. Pour cette raison, et cela n'est jamais dit par les médias, il est de facto impossible d'alimenter un réseau électrique uniquement avec des éoliennes, sauf si bien entendu il existait des possibilités de stockage suffisantes, permettant de stocker les excédents de production par rapport à la consommation, pour les mobiliser en urgence lors des insuffisances de production.

Quelques ordres de grandeur permettent de se rendre compte à quel point est irréaliste de chercher à assurer uniquement avec des éoliennes la production d'électricité dans un pays comme le nôtre :

La production d'électricité française est actuellement de l'ordre de 520 TWh par an. Produire cette quantité d'électricité avec des éoliennes n'est pas strictement impossible, mais il faudrait pour cela couvrir la France entière d'éoliennes : le facteur de charge annuel de ces éoliennes serait alors plus faible qu'actuellement, car ce sont les meilleurs sites qui ont été pour l'instant utilisés. En prenant un facteur de charge moyen de 19%, contre 21 % actuellement, on trouve qu'il faudrait pour cela 300 000 MW d'éoliennes, soit 100 000 éoliennes de 3 MW et de 150 mètres de haut !

Mais cette électricité, à cause de son intermittence, serait à peu près inutilisable, sauf à disposer d'imposants stockages. Or les meilleurs stockages connus perdent environ 30 % de l'énergie stockée.

C'est donc, en admettant que ces stockages aient pu être créés, 140 000 éoliennes qu'il faudrait, soit environ 1 éolienne géante pour 4 km² du territoire métropolitain, une tous les 2 km de distance. Les Français vivant hors des très grandes villes ne seraient donc plus nulle part hors de vue d'éoliennes géantes de quelque côté qu'ils se tournent, ce qui est très douteux qu'ils acceptent. On voit bien d'ailleurs la grogne fortement monter, alors que moins de 10 000 éoliennes ont encore été installées.

Mais quelle devrait être pour cela la capacité de stockage à construire ? La production à stocker pour tenir une semaine sans vent serait de 520/52 TWh, soit de l'ordre de 10 TWh. La méthode la meilleure et la moins coûteuse actuellement consiste à monter de l'eau dans des barrages en cas de surproduction d'électricité, pour la turbiner ensuite pour produire de l'électricité en cas de sous-production. Ces installations sont appelées stations de transfert d'énergie par pompage (STEP). Il en existe en France, mais pour une capacité totale de stockage de l'ordre de 100 GWh, soit 1% de ce qui serait nécessaire. Il en faudrait donc 100 fois plus, en fait 200 fois à 300 fois plus pour pallier deux ou trois semaines successives sans vent, ce qui peut fort bien se produire d'après l'expérience des années passées. Or cela est strictement impossible car très peu de sites nouveaux d'implantation de STEP sont en fait envisageables en France. Le problème est le même dans toute l'Europe. Une deuxième méthode serait l'utilisation de batteries, dont le rendement de stockage est à peu près le même. Mais la capacité d'une batterie est très faible, environ 100 Wh par kilogramme. Pour stocker 10 TWh, il en faudrait 100 millions de tonnes, à remplacer tous les 5 ans ! D'autre part, il faudrait disposer de batteries très puissantes à vitesse de charge considérable, étant donné la rapidité, et parfois la brutalité, des fluctuations de vitesse du vent.

Il a été fait beaucoup de publicité à ce qu'on appelle le power-to-gas, comme méthode pour stocker l'électricité produite par des éoliennes : l'idée est de produire avec cette électricité de l'hydrogène par électrolyse de l'eau, puis de produire du gaz, en fait du méthane (CH₄), en faisant se combiner cet hydrogène à du gaz carbonique (CO₂). Puis le méthane serait brûlé dans une centrale à gaz pour produire de l'électricité. Outre l'extrême complexité de cette méthode et donc les risques très élevés de dysfonctionnement, et son énorme coût d'investissement, **la perte d'énergie serait ici énorme**, d'environ 80 % en conditions industrielles sinon plus (<http://www.sauvonsleclimat.org/pertes-%C3%A9nerg%C3%A9tiques-du-sch%C3%A9ma-%C2%AB-power-to-gas-gas-to-power-%C2%BB/35-fparticles/1817-pertes-%C3%A9nerg%C3%A9tiques-du-sch%C3%A9ma-%C2%AB-power-to-gas-gas-to-power-%C2%BB.html>). C'est donc au moins 400 000 éoliennes et non plus 140 000 qui seraient alors nécessaires, c'est-à-dire en moyenne une environ tous les km sur l'ensemble du territoire habitable métropolitain hors villes !!! Notons à ce propos que cela signifierait également l'évacuation de la plus grande partie des populations vivant hors des villes, car il est impossible de vivre à petite distance d'une éolienne géante, pour raison de sécurité et de santé.

Il est fait également beaucoup de publicité à ce que l'on appelle les réseaux intelligents (Smart Grids) pour faire face à ces problèmes, qui découlent essentiellement du caractère intermittent de l'éolien et du solaire PV et de l'impossibilité de stocker l'électricité en quantités suffisantes. Ces méthodes permettent un lissage de la production d'électricité par de petits stockages judicieusement disposés, et celle de la consommation d'électricité par une incitation financière à moins consommer lors des périodes de grande consommation, mais aussi en coupant d'autorité l'alimentation électrique des consommateurs aux moments les plus critiques. Ces méthodes ont des mérites, mais elles ne peuvent produire que des améliorations de second ordre par rapport aux problèmes posés, car les stockages ne pourront pas et de très loin avoir une capacité suffisante pour faire face à de fortes fluctuations, et les diminutions plus ou moins autoritaires de consommation sont des contraintes supplémentaires imposées aux consommateurs. Elles ne pourraient pas par exemple faire face à une «panne de vent» de plus d'une heure, car comment lisser une production qui n'existe pas ? Elles sont

déliçates à mettre en œuvre et peu fiables. Et bien sûr leur coût très élevé s'ajoutera à la liste déjà longue des coûts supplémentaires entraînés par les ENR i, au bénéfice des fabricants et aux dépens du consommateur ! Voir par exemple une analyse de ce système sur <http://euanmearns.com/how-smart-is-a-smart-grid/#more-14937>

Notons que la situation ne serait pas meilleure si l'on voulait produire toute l'électricité française avec des panneaux solaires, et une combinaison d'éoliennes et de panneaux solaires n'y changerait pas grand-chose ! La découverte de méthodes de stockage de l'électricité de beaucoup plus grandes capacités massives et beaucoup moins coûteuses que les actuelles est donc la clef pour rendre crédibles l'éolien et le solaire photovoltaïques comme sources alternatives d'électricité. **Mais pour l'instant nulle part dans le monde de solution suffisante ne pointe à l'horizon, malgré un très gros effort de recherche à ce sujet.**

Pour une analyse approfondie des problèmes posés par l'intermittence dans le cas de l'Allemagne, voir par exemple http://www.cesifo-group.de/ifoHome/publications/working-papers/CESifoWP/CESifoWPdetails?wp_id=19225905

Voir aussi, pour les limites de l'intermittence

<https://ourfinitemworld.com/2016/08/31/intermittent-renewables-cant-favorably-transform-grid-electricity/>

Rappel:

- Le **watt** (W) est l'unité de **puissance** dans le système d'unités international (SI). Ses multiples couramment utilisés sont le kilowatt (kW) qui vaut 1000 watts, le mégawatt (MW), qui en vaut 1 million, le gigawatt (GW) qui en vaut 1 milliard, et le térawatt (TW) qui en vaut 1000 milliards.
- Le **wattheure** (Wh) est une unité de production ou de consommation d'**énergie** couramment utilisée pour l'énergie électrique. Elle correspond à l'énergie produite ou consommée par une installation de 1 watt de puissance fonctionnant constamment à cette puissance pendant une heure. Ses multiples couramment utilisés sont le kWh (1000 wattheures) bien connu des consommateurs d'électricité, le mégawattheure (MWh = 1 million de wattheures ou encore 1000 kWh), le gigawattheure (GWh = 1 milliard de wattheures, ou encore 1 million de kWh) et le térawattheure (TWh = 1000 milliards de wattheures ou encore 1 milliard de kWh).