

L'efficacité des éoliennes

Préambule

L'article de Michel LUNG « L'énergie éolienne » paru en mai 2006 dans Les Plumes (et consultable sur le site de l'ARA) dit tout sur l'éolien. Il mettait déjà en évidence certaines failles de ce système de production électrique, notamment son intermittence et les coûts induits.

Introduction

Après l'engouement de ces vingt dernières années, produire de l'électricité avec seulement des éoliennes est depuis peu de plus en plus critiqué dans les médias. L'exemple allemand montre effectivement que le tout éolien conduit à un résultat inverse au but premier recherché : émettre le moins de CO₂ possible.

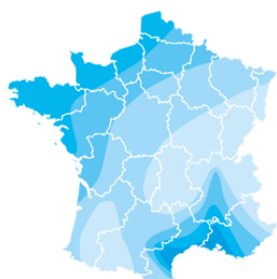
Nonobstant ce constat, la France poursuit son programme d'installation d'éoliennes. De nombreux projets de parcs éoliens, notamment en mer, sont prévus ou en cours de réalisation. Le site Vie-publique.fr annonce que l'éolien terrestre remplacera les éoliennes en fin de vie par des éoliennes de dernière génération plus performantes. L'éolien actuel ne serait donc pas assez efficace ? L'efficacité d'une éolienne ne dépend pas que de sa puissance, ça dépend aussi du vent !

Le vent

L'ADEME qui publie la carte ci-après précise que la quasi-totalité des éoliennes sont installées sur des sites aux vitesses moyennes de vent supérieures à 20 km/h.

LE GISEMENT ÉOLIEN

(hors Corse et DOM) en km/h



	VITESSE DU VENT*				
	Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Bocages denses, bois, banlieues	< 12,6	12,6 - 16,2	16,2 - 18	18 - 21,6	> 21,6
Rase campagne, obstacles épars	< 12,6	16,2 - 19,8	19,8 - 23,4	23,4 - 27	> 27
Prairies plates, quelques buissons	< 18	18 - 21,6	21,6 - 25,2	25,2 - 30,6	> 30,6
Lacs, mer	< 19,8	19,8 - 25,2	25,2 - 28,8	28,8 - 32,4	> 32,4
Crêtes, collines	< 25,2	25,2 - 30,6	30,6 - 36	36 - 41,4	> 41,4

*50 mètres au-dessus du sol en fonction de la topographie.

Le gisement éolien en France métropolitaine (source ADEME)

A l'évidence le choix de l'implantation d'un parc éolien a une très grande importance vis-à-vis de sa production électrique.

La puissance incidente du vent traversant une éolienne est donnée par la formule : $P = \frac{E}{t} = \frac{1}{2} A \rho v^3$
Où P est la puissance éolienne incidente, E est l'énergie, t est le temps, ρ est la densité de l'air, v est la vitesse du vent, A est la surface perpendiculaire à la direction du vent balayée par les pales.

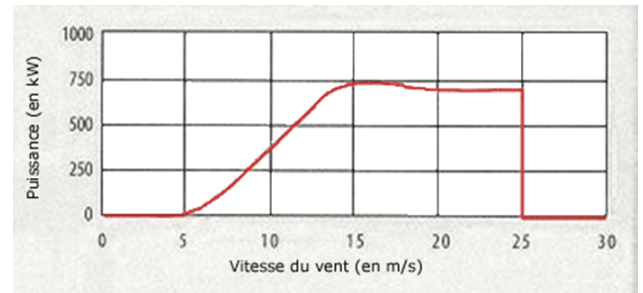
Cette puissance est proportionnelle à la surface balayée ce qui explique que les éoliennes sont de plus en plus grandes. Elle est aussi proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

Lorsque le vent est trop fort, au-delà de 90 km/h (25 m/s) les éoliennes doivent se mettre en sécurité.

L'éolienne

Pour une vitesse de vent donnée, la puissance récupérable est bien inférieure à la puissance éolienne incidente. D'abord, il existe une limite physique incontournable puisque l'air doit conserver une énergie résiduelle afin qu'il subsiste un écoulement. Ensuite, il faut tenir compte du rendement global de l'éolienne. Au bout du compte il est difficile de dépasser 42 % de l'énergie éolienne incidente.

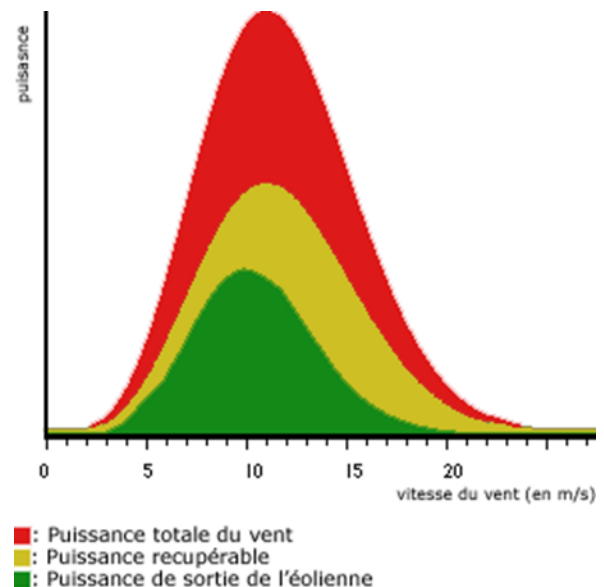
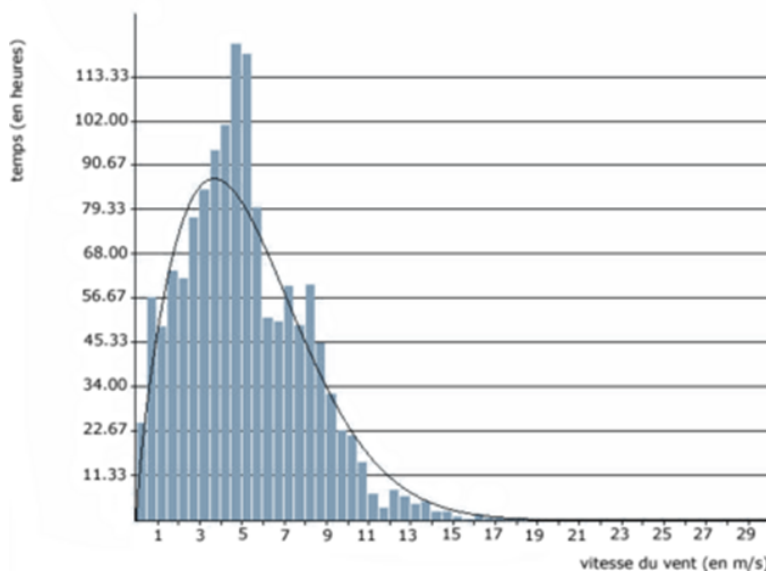
Les constructeurs d'éoliennes donnent une courbe normalisée de puissance électrique délivrée par l'éolienne en fonction de la vitesse du vent. Par exemple :



Le potentiel éolien d'un site

Pour chaque site une courbe (dite de Weibull) exprime le potentiel énergétique en donnant la fréquence d'occurrence des différentes vitesses de vent (exemple 1^{ère} courbe ci-dessous).

En multipliant la puissance de chaque vitesse de vent par la probabilité d'occurrence de cette vitesse selon la répartition de Weibull, la distribution de l'énergie éolienne (en kWh/m²/an ou en W/m²) peut être calculée pour des vitesses de vent différentes. La courbe correspondante est appelée la densité de puissance (exemple 2^{ème} courbe ci-dessous).



A noter que les vents forts, qui contiennent le plus d'énergie, influent beaucoup sur la puissance moyenne, bien qu'ils aient une faible probabilité. Ce constat est susceptible d'influer beaucoup dans le choix de l'éolienne. La tentation sera grande de privilégier des productions élevées mais peu fréquentes. Ce qui va encore renforcer l'aléatoire de la production éolienne.

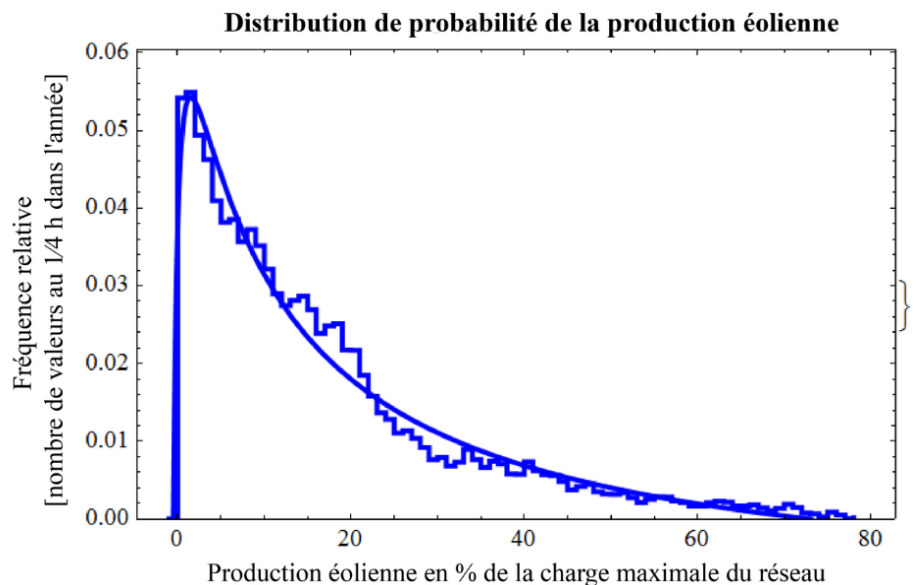
La tendance est d'augmenter la dimension des éoliennes afin d'obtenir une puissance unitaire plus importante et une meilleure productivité. La densité de ces éoliennes surdimensionnées est alors diminuée

ce qui peut être aussi intéressant. Mais en cas de remplacement d'éoliennes en gardant les implantations existantes l'effet de sillage sera augmenté.

La variabilité du vent

La force du vent est très variable. Aussi comme la production éolienne en dépend directement, elle est très fluctuante et peu prévisible. Elle est souvent qualifiée d'intermittente.

La courbe montre la distribution de probabilité de la production éolienne en Allemagne en 2010. En abscisse : production éolienne en % de la charge maximale du réseau ; en ordonnée : fréquence relative (nombre de valeurs au quart d'heure dans l'année). On note la concentration des fréquences sur les faibles valeurs de production.



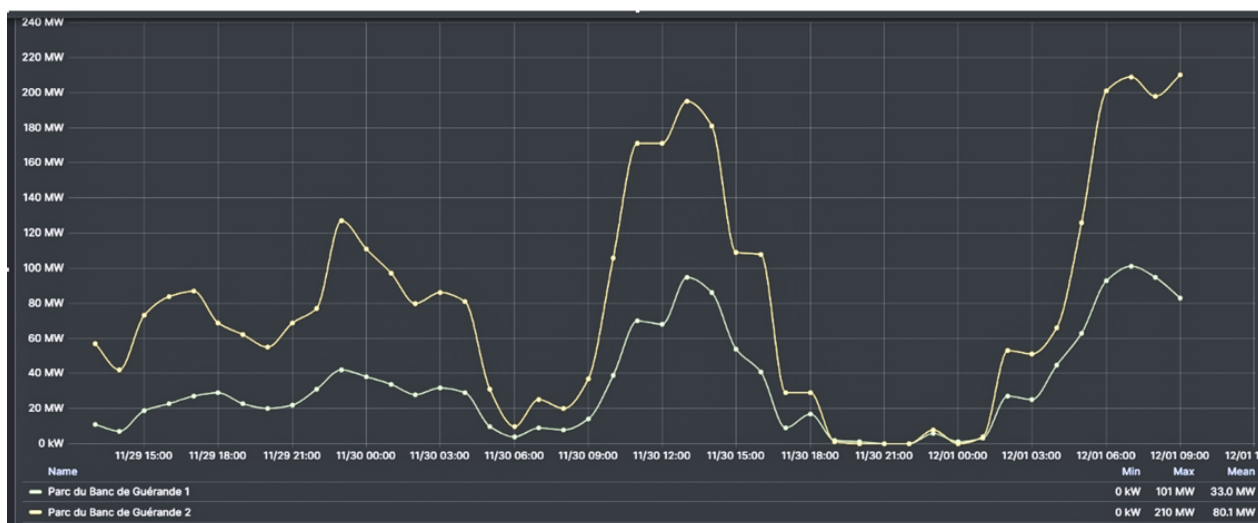
Lors des épisodes de vent faible qui peuvent atteindre une semaine voire deux, il est nécessaire de disposer de moyens de production modulables (cycles combinés gaz, hydraulique, etc.), en plus de ceux destinés à satisfaire les hausses de la demande, afin de compenser la baisse de puissance fournie par les éoliennes. Ces moyens de production, à disposition, représentent théoriquement un parc installé équivalent à la puissance éolienne installée si le pays ne dispose pas par ailleurs d'une production de base.

Éolien en mer

Serait-ce différent avec des éoliennes en mer ?

L'ADEME dans son guide indique qu'elles produisent plus d'électricité que les éoliennes à terre car elles sont plus grandes et plus puissantes et les vents sont plus forts et plus réguliers.

Plus réguliers ? Le site de Révolution Énergétique a publié un article intitulé : « Voici la vertigineuse intermittence du parc éolien en mer de Saint-Nazaire ». Dans cet article un lien permet de consulter la production en temps réel de ce puissant parc de 480 MW. La capture au hasard de la production du 29/11 au 01/12 2023, montre clairement l'intermittence de l'éolien, même en mer.



Production électrique du parc de Saint-Nazaire du 29/11 au 01/12 2023

En haut Parc de Guérande 2, en bas Parc de Guérande 1

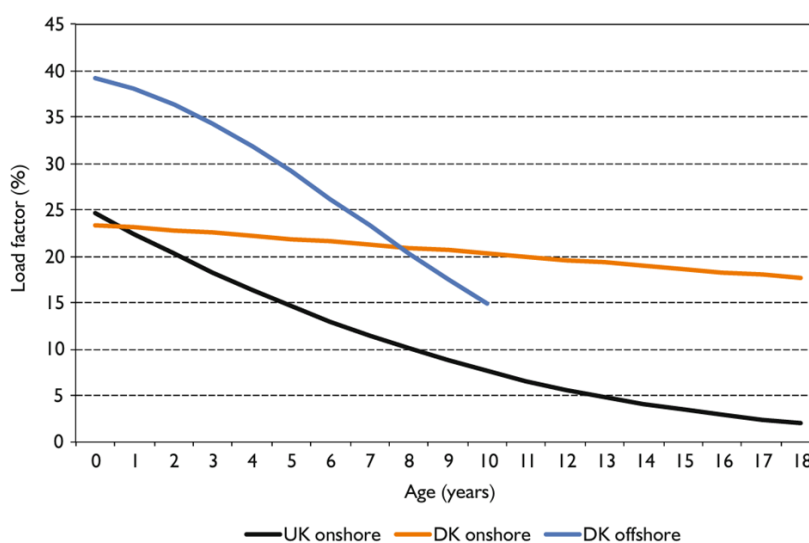
Le facteur de charge

Le facteur de charge correspond au ratio entre la quantité réelle d'énergie produite sur une année et la production théorique maximale d'une éolienne fonctionnant à pleine puissance à plein temps pendant la même durée. C'est ce ratio qui mesure réellement l'efficacité d'une éolienne. Ramené au niveau d'un parc ou d'un pays ce ratio mesure effectivement l'efficacité de production éolienne du parc ou de la totalité des installations d'un pays.

Les données RTE montrent effectivement que le facteur de charge moyen de l'éolien terrestre dépasse rarement 25% (26,2 % en 2023 mais 22,1 % en 2022). Sans doute que pour l'éolien en mer il en sera de même et que les valeurs atteintes seront bien inférieures aux valeurs annoncées. En 2023, le parc de St Nazaire, dans sa première année de fonctionnement, a réalisé un facteur de charge moyen annuel de 35%. Bien loin du facteur de charge de 44 % attendu.

La production réelle est inférieure à l'attendu

L'optimisme des promoteurs les a sans doute amenés à négliger certains phénomènes qui par effet d'addition expliquent l'importante différence constatée entre les performances annoncées et les performances réelles. Ainsi en France malgré une augmentation de la puissance installée passée de 17,6 GW en 2020 à 20,6 GW en 2022, la production électrique des éoliennes terrestres sur la même période a diminué : de 37,9TWh en 2020 elle est passée à 37,5 TWh en 2022. L'étude de Gordon Hughes, professeur d'économie de l'université d'Édimbourg signale que le facteur de charge pour les parcs éoliens



terrestres britanniques atteint son pic de production de 24 % au bout d'un an et qu'il chute progressivement à 15 % à dix ans puis 11 % à quinze ans. Certes cette étude date de 2012 mais elle interpelle. D'autant plus qu'en y regardant de plus près on trouve des résultats pires encore.

Explications du déclin de la production

Le vieillissement des éoliennes

Les éoliennes, comme tout équipement mécanique, sont sujet à des pannes et à usure.

Les pannes peuvent être plus ou moins graves : de la panne majeure qui entraîne de grosses réparations à la petite défaillance. Dans les deux cas, la production électrique est suspendue jusqu'à ce que la réparation soit effectuée. Gordon Hughes relève que 80 % des éoliennes offshore connaissent une panne majeure ou une défaillance dans leurs huit premières années contre 20 % pour les petites éoliennes onshore.

L'usure fait aussi son office et la production de l'éolienne décroît dans le temps. L'usure des pales va affecter le rendement aérodynamique.

Tous ces problèmes se cumulent à tel point que Gordon Hughes juge qu'au-delà de 16 ans le maintien en fonctionnement d'une éolienne n'est plus financièrement intéressant.

Les meilleurs gisements de vent ont été pris en premier

La production actuelle des éoliennes tient compte du fait que les premières éoliennes ont été installées sur les sites les plus ventés et potentiellement les plus productifs

Justement, comme beaucoup de parcs ont atteint ou vont atteindre la date fatidique de 15 ans à partir de laquelle ils sortent des mécanismes de rachat d'électricité noués avec l'État. Il sera intéressant pour les producteurs éoliens de remplacer leurs vieilles éoliennes par des modèles plus récents et de nouveau subventionnés. Vu les capacités de production électrique qui sortent et vont sortir des tarifs garantis de rachat, ce n'est pas anecdotique pour la production éolienne et surtout pour les finances de l'État !

L'effet sillage

Le vent, après avoir traversé une éolienne, perd en énergie cinétique, car l'éolienne en capte une partie importante (près de 50 % au pic de son rendement, sans tenir compte du mât). La production des éoliennes situées derrière, sous le vent, va inévitablement en subir les conséquences.

La baisse des régimes de vent en Europe

Une étude de 2022 de l'Institut Copernicus organisme de la Commission européenne montre que l'Europe a connu un record historique de baisse des vents en 2021.

Faut-il s'en inquiéter ? Lorsque l'on regarde les anomalies de vitesse de vent pour ces pays sur la période 1979 - 2021 elles se retrouvent aussi à la hausse une autre année. Cette étude ne montre pas une baisse continue en 43 ans. Mais elle met en évidence que les vitesses moyennes de vent et en conséquence les productions électriques peuvent fortement varier d'une année à l'autre.

Les arrêts de production volontaires

Outre les arrêts pour manque de vent (12 km/h), vent trop fort (90 km/h) ou encore travaux sur l'équipement ou le réseau, les éoliennes peuvent aussi être bridées ou arrêtées temporairement pour réduire le bruit ou pour protéger la biodiversité (migrations d'oiseaux, reproduction de chauves-souris...).

Les éoliennes peuvent aussi être mises à l'arrêt pour éviter une surcharge électrique du réseau de distribution. Dans quelques années, avec le raccordement des nombreux projets éoliens et photovoltaïques prévus, les problèmes vont s'intensifier et ces productions électriques variables et intermittentes devront être profondément écrêtées de plus en plus souvent.

Bilan technique et financier

Au final, les éoliennes arrivent à restituer en électricité entre 25 % onshore et 35 % offshore de leur puissance installée. Cela peut paraître faible mais à y réfléchir, c'est plutôt un exploit d'obtenir de tels résultats à partir d'un élément que l'on ressent si peu sauf lors des tempêtes. La commission d'enquête du Sénat dont les conclusions ont été présentées à la presse le 4 juillet 2024 indique clairement que « la présence d'éolien et de photovoltaïque dans le mix électrique augmente le coût de production moyen du système » et informe qu'Enedis et RTE prévoient d'investir pour le réseau 200 milliards d'Euros d'ici 2040 !

Comme 200 milliards d'Euros ont déjà été engagés en subventions et soutiens le développement des EnR continue en France au rythme annoncé, le surcoût pour le pays va donc dépasser rapidement les 400 milliards d'Euros! De quoi construire 20 EPR2 !

Et maintenant ?

Des voix de scientifiques se sont élevées et des études ont été produites depuis des décennies pour alerter sur les effets négatifs du développement à outrance des EnR et en particulier de l'éolien. Et il y a eu la crise électrique de 2022 qui a donné raison aux lanceurs d'alerte et permis une prise de conscience des Français.

Suite à un problème de sûreté découvert à l'automne 2021 EDF a dû arrêter 10 réacteurs pour réparation, ce qui a diminué de près de 10 GW la puissance générée en moyenne sur 2022. Les médias ont sensibilisé le public sur le risque de pénurie par de nombreux appels pour que chacun réduise sa consommation électrique. Le consommateur prenait conscience que sans production nucléaire suffisante la France pouvait se retrouver à tout moment sans électricité.

Le 10 février 2022, à Belfort, Emmanuel Macron annonce la construction de six EPR 2, en ouvrant une option pour huit réacteurs supplémentaires ! Après avoir continué la politique énergétique précédente au détriment du nucléaire, le Président décide donc d'entamer un nouveau grand programme nucléaire. De plus, il fait connaître sa décision de ne plus fermer aucun réacteur capable de produire en toute sûreté (comme à Fessenheim).

Ce sont donc d'excellentes nouvelles pour garantir notre sécurité d'approvisionnement électrique, une décarbonation efficace de l'économie, et la réindustrialisation du pays. Mais aujourd'hui il reste beaucoup de chemin à faire. Si la décision de relancer la construction de nouvelles centrales nucléaire est bien prise et gravée dans la loi du 22 juin 2023 relative à l'accélération du nucléaire, les autres préconisations de la commission sénatoriale ne sont toujours pas à l'ordre du jour.

Aujourd'hui la France va-t-elle en même temps poursuivre le développement effréné des EnR et en particulier de l'éolien quoiqu'il en coûte ? Le projet de PPE 3 de fin 2024 le prévoit.

PS : L'article de Michel LUNG a été complété par la Conférence sur les éoliennes organisée par Jacques Boudier, Jacques Dollfus, François Justin, Jean Millot et Jean-Marc Niezborala dont le compte rendu a été publié dans les Plumes n°52 de décembre 2011.

Le présent article est un résumé de l'article complet qui peut être consulté sur notre site internet : ARA-SGN-EW | Association des retraités de SGN, Orano projets et EW

Pour tous ceux qui veulent suivre la production d'électricité en France au jour le jour par les différents moyens de production consulter le site de RTE :

<https://www.rte-france.com/eco2mix/la-production-delectricite-par-filiere>

Et pour voir la contribution CO2 de la production électrique par pays le site : <https://app.electricitymaps.com/map/72h/hourly>