



**HAL**  
open science

## L'électricité des éoliennes

Roger Balian

► **To cite this version:**

| Roger Balian. L'électricité des éoliennes. Sites et monuments, In press. cea-04544559

**HAL Id: cea-04544559**

**<https://cea.hal.science/cea-04544559>**

Submitted on 12 Apr 2024

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## L'ÉLECTRICITÉ DES ÉOLIENNES

Roger BALIAN, membre de l'Académie des Sciences

Plusieurs articles de *Sites et Monuments* ont déploré que l'installation d'éoliennes en tel ou tel lieu ait porté atteinte à notre patrimoine paysager. Mais de seules raisons esthétiques rendent-elles légitime de se battre contre ces moulins à vent modernes en faisant abstraction des enjeux économiques et sociétaux ? Il convient d'estimer hors de toute idéologie l'intérêt énergétique de ces machines, en pesant rationnellement leurs avantages et inconvénients en tant que source d'électricité. Selon les régions du monde, les questions se posent très différemment. Il est vital d'alimenter en énergie les habitants de villages isolés, et l'éolien s'impose alors souvent. Mais quelle est son utilité réelle en France ? Les réponses ne sont pas simples et doivent reposer sur des comparaisons chiffrées.

### Une énergie diluée

On peut classer les sources d'énergie selon la masse de matière à mettre en œuvre pour fournir une quantité d'énergie électrique donnée, disons 1 kilowatt-heure, quantité pour laquelle nous payons autour de 0,10 €. D'énormes différences apparaissent alors. La source la plus concentrée est l'uranium utilisé dans les centrales nucléaires, dont *3 milligrammes* suffisent pour produire 1 kWh. Pour les combustibles fossiles (charbon, fioul, gaz), la masse à brûler pour libérer 1 kWh d'énergie électrique est de l'ordre de *100 à 200 grammes*. En ce qui concerne le vent, le but est de capturer une partie de l'énergie cinétique associée au mouvement de l'air ; celle-ci atteint 1 kWh pour une masse d'air de *20 tonnes* (15 000 m<sup>3</sup>) se déplaçant à la vitesse de 70 km/h.

Brasser de telles masses d'air nécessite une implantation d'éoliennes sur de larges territoires. Alors que la production en France des trois quarts de l'électricité se concentre actuellement sur seulement 19 sites regroupant 58 réacteurs nucléaires, la production d'une quantité significative d'électricité éolienne exige l'occupation de vastes espaces : afin de fournir la même quantité d'énergie annuelle qu'*un seul réacteur*, il faut capturer le vent sur un territoire de *500 km<sup>2</sup>* à l'aide de *1600 éoliennes* puissantes (de 2 MW).

De plus, il faut laisser entre éoliennes voisines un espace adéquat, dépendant de leur taille, pour éviter que des interactions entre leurs sillages ne réduisent leur rendement. Il revient alors énergétiquement à peu près au même de couvrir une surface donnée avec beaucoup de petites éoliennes ou avec un nombre plus réduit de grandes. La seconde solution est moins coûteuse ; elle s'impose progressivement, avec des éoliennes toujours plus puissantes, comportant des pales aussi longues et des mâts aussi hauts que possible.

## Une énergie intermittente

Le vent souffle quand il veut ! Et sa force peut varier considérablement. La puissance installée (ou « nominale ») d'une éolienne caractérise l'électricité qu'elle fournit à des moments où la vitesse du vent est aux environs de 70 à 80 km/h. A ces vitesses, l'efficacité est maximale. Mais l'énergie électrique engendrée dépend crucialement de la force du vent : lorsque celui-ci souffle *deux fois moins vite*, la puissance disponible pour la production électrique est *divisée par 8*. Si le vent est trop faible, la rotation des pales devient inutile ; à l'inverse, au-dessus de 90 km/h, elle doit être arrêtée pour des raisons de sécurité.

Il importe évidemment d'implanter les éoliennes en des lieux ventés. Cependant, bien qu'on les voie tourner pendant 80% du temps, elles ne peuvent fonctionner à leur régime optimal que pendant d'assez courtes périodes : leur production moyenne d'électricité sur une année correspond à un maximum de 25% de la puissance installée (le chiffre est supérieur pour les éoliennes en mer). Il est trompeur de comparer, comme on le fait trop souvent, les diverses sources d'énergie électrique en se basant sur les puissances installées ; il faut considérer les productions effectives, seules utiles à la société. De même, l'utilité d'une voiture se mesure mieux par la distance annuellement parcourue que par la vitesse maximale qu'elle est susceptible d'atteindre. Ainsi, en France, à la fin de 2016, l'éolien a représenté 8,9% de la puissance totale installée ; il est parvenu à fournir 3,9% de l'énergie électrique sur l'année, mais seulement parce que les éoliennes bénéficient d'une priorité absolue d'accès au réseau, devant les autres sources.

La variabilité de la vitesse du vent constitue l'inconvénient majeur de l'éolien. Elle se manifeste à toutes les échelles de temps, d'une heure à l'autre, d'un jour à l'autre, d'un mois à l'autre et même d'une année à l'autre (fig. 1). Il arrive qu'un anticyclone durable entraîne un manque de vent pendant plusieurs jours, et ceci en hiver, saison où la consommation est la plus forte. La production électrique éolienne est donc intermittente par nature ; de plus, elle est difficilement prévisible sur plus de quelques jours. On pourrait penser que ses fortes variations se compensent lorsqu'on cumule l'électricité issue de nombreuses éoliennes dispersées sur un vaste territoire. Dans cette perspective, l'interconnexion de l'ensemble des réseaux de distribution européens permet des transferts d'un pays à l'autre ; mais on constate que non seulement à l'échelle de la France, mais même à l'échelle de l'Europe les fluctuations de la production éolienne totale restent énormes (fig. 1).

## L'emploi de l'électricité éolienne

Comment dans ces conditions l'éolien s'intègre-t-il dans le système de distribution de l'électricité ? Il importe qu'à chaque instant la puissance électrique totale produite soit ajustée sur la puissance appelée par les consommateurs. La résolution de ce problème crucial serait facilitée si l'on savait stocker des quantités suffisantes d'énergie électrique. Il existe certes divers procédés de stockage (comme les batteries), mais leur capacité est limitée pour diverses raisons, en particulier scientifiques. Le seul moyen efficace permettant de lisser des pointes de production ou de consommation est un procédé indirect faisant appel à des barrages

hydroélectriques. Par exemple, lorsque de l'électricité éolienne est produite en excédent au Danemark, elle est importée (à bas prix) par la Norvège et la Suède ; ces pays en transportent une partie vers certains barrages de montagne, où elle sert à pomper de l'eau depuis un bassin situé la base du barrage jusque dans le réservoir supérieur ; ultérieurement, la chute de l'eau permet de récupérer à nouveau de l'électricité (revendue au prix fort) lorsque le besoin s'en fait sentir. Mais cela fonctionne seulement parce que le Danemark produit et consomme beaucoup moins d'électricité que ses voisins nordiques. En France, le même procédé est utilisé, mais la capacité hydraulique de montagne disponible pour cet usage est notoirement trop faible, et il existe trop peu de sites qui pourraient encore être équipés en barrages de retenue et en stations de pompage.

La compensation des minima ou maxima de l'éolien ne peut donc guère reposer que sur la croissance ou la décroissance de la puissance électrique engendrée par d'autres sources. En France, où l'électricité est à 75% d'origine nucléaire, l'intermittence de l'éolien est contrebalancée en grande partie par une modulation de la production de certains réacteurs, qui est susceptible de varier de quelques pourcents en une minute. A défaut, et en particulier dans des pays peu équipés en électronucléaire, on en est réduit à s'appuyer sur des centrales à flamme (gaz, charbon, fioul), dont la production électrique peut elle aussi suivre rapidement la demande mais s'accompagne d'émissions de gaz carbonique.

Un autre problème concerne la distribution d'électricité, dont la gestion nécessite de maintenir en permanence l'équilibre entre production et consommation. Au fur et à mesure qu'augmente la part de l'éolien, son intermittence rend le contrôle du réseau plus difficile : il faut non seulement suivre les besoins mais aussi compenser l'intermittence. La stabilité du réseau n'est assurée que si l'éolien reste minoritaire ; on estime que si sa part dépassait les 20%, la sécurité de l'approvisionnement électrique commencerait à ne plus être garantie. Le Danemark excède déjà ce seuil de 20%, si on le considère isolément ; l'équilibre de son réseau n'est maintenu que grâce à des échanges permanents et massifs d'électricité avec ses plus grands voisins, exportations quand le vent souffle, importations quand il s'arrête.

Enfin, le réseau actuel de distribution de l'électricité est adapté à une production centralisée, basée sur des centrales de forte puissance en petit nombre. A l'inverse, l'éolien ainsi que le photovoltaïque sont des sources d'énergie dispersées sur le territoire. Si leur proportion dans le mix énergétique augmente beaucoup, il faut reconfigurer le réseau pour adapter le transport de l'électricité à cette dispersion de production. L'Allemagne doit déjà construire de nouvelles lignes à haute tension entre le nord (où sont installées les éoliennes) et le sud (où la consommation est forte). Le déploiement croissant des éoliennes risque ainsi de multiplier parallèlement le nombre de pylônes électriques... à moins d'enterrer les lignes en faisant croître considérablement le coût de transmission de l'électricité.

## **Une énergie écologique ?**

L'humanité doit aujourd'hui faire face à un problème majeur, la concentration croissante de gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) dans l'atmosphère. Au cours des derniers 800 000 ans, le

taux de CO<sub>2</sub> oscillait entre 0,18 ‰ (pendant les glaciations) et 0,28 ‰ (pendant les périodes interglaciaires). Restée voisine de 0,28 ‰ entre le Moyen Age et 1800, la proportion de CO<sub>2</sub> a rapidement crû depuis, principalement en raison de notre utilisation croissante des combustibles fossiles, charbon, pétrole et gaz ; actuellement, elle atteint 0,40 ‰. Cette augmentation du CO<sub>2</sub> atmosphérique a deux effets incontrôlables, le réchauffement climatique global et l'acidification des océans, avec ses conséquences sur la biodiversité marine.

Il importe donc de réduire nos émissions de CO<sub>2</sub>. En ce qui concerne l'électricité, une énergie de 1 kWh issue d'une centrale à gaz, fioul ou charbon s'accompagne d'un dégagement de 500 g à 1 kg de CO<sub>2</sub>. Face à ce problème, l'éolien, qui permet de produire de l'électricité sans aucun rejet direct de CO<sub>2</sub>, fait souvent figure de symbole exemplaire. Mais en fait, il partage cet avantage avec l'électronucléaire, l'hydroélectrique et le photovoltaïque, qui ne rejettent pas non plus de CO<sub>2</sub>. Certes, dans le « bilan carbone », il faut aussi inclure les émissions de CO<sub>2</sub> provoquées par la construction des générateurs d'électricité, par exemple la fabrication des 1500 tonnes de béton destinées à ancrer une éolienne au sol ; mais ceci ne représente, pour ces diverses énergies décarbonées, qu'un dégagement de moins d'une dizaine de grammes de CO<sub>2</sub> par kWh.

Cependant, dès que le nombre d'éoliennes devient important, les émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'éolien risquent d'augmenter considérablement par un effet indirect. En effet, les pays producteurs d'électricité éolienne qui ne disposent pas suffisamment d'électronucléaire ni de capacités de stockage hydroélectrique ne peuvent pallier les manques de vent qu'à l'aide de centrales à combustibles fossiles (fig. 2). Ainsi, l'Allemagne, en remplaçant progressivement le nucléaire par l'éolien, est conduite à brûler de plus en plus de charbon et de lignite ; ses émissions globales de CO<sub>2</sub> ont même tendance à croître. En conséquence, chaque Allemand rejette, pour la production de son énergie électrique, *8 fois plus de CO<sub>2</sub>* qu'un Français.

Afin d'utiliser les éoliennes plus rationnellement en ce qui concerne le CO<sub>2</sub>, il a été proposé d'employer en partie leur électricité pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau. Cet hydrogène servirait ensuite de carburant pour les véhicules, dont les émissions considérables de CO<sub>2</sub> pourraient ainsi être efficacement réduites. Malheureusement, cette idée séduisante mais futuriste se heurte à des coûts prohibitifs et à des rendements bas.

Le démantèlement des éoliennes, dont la durée de vie est d'une vingtaine d'années, posera un autre problème environnemental. Le recyclage des superstructures sera facile, mais on ne sait pas encore à qui incombera la responsabilité de l'enlèvement des socles en béton.

En définitive, même en laissant de côté les aspects économiques, esthétiques ou juridiques et les problèmes de subventions, un développement trop massif de l'éolien aurait des conséquences négatives, mettant en particulier en danger la stabilité du réseau électrique. L'éolien peut certes répondre à une partie de nos besoins en électricité, mais ne peut rester qu'un appoint, sans dépasser les 20%. Il ne faut aussi pas oublier qu'en France, son intermittence est surmontée grâce à l'électronucléaire ; c'est la complémentarité de ces deux sources qui évite des émissions supplémentaires de CO<sub>2</sub>.

+++++

Fig. 1. Variations de la puissance électrique éolienne au long d'un mois d'hiver et au long d'un mois d'été, pour la France et pour l'ensemble de 8 pays européens. Les fortes fluctuations de la production française ne peuvent être contrebalancées par des échanges d'énergie éolienne avec l'étranger, car un vent faible en France coïncide rarement avec un vent fort dans d'autres pays d'Europe. (Figure de J.-P. Pervès, extraite de l'article *La transition énergétique et la production d'électricité : la face cachée de la loi « LTE »*, publié sur le site <https://sauvonsleclimat.org>.)

Fig. 2. Éolienne et centrale thermique Nuon à Sloterdijk, Amsterdam, Pays-Bas. Cette centrale a une puissance maximale de 1229 MW, soit 614 fois celle de l'éolienne fonctionnant à pleine puissance. En l'absence d'électronucléaire, l'intermittence de la production électrique des éoliennes est souvent compensée comme ici par la mise en service de centrales thermiques émettrices de CO<sub>2</sub>.

+++++

La figure 1 (courbes avec textes) doit reproduire le fichier intitulé « Foisonnement Europe », que je joins sous forme power point et sous forme pdf.

La figure 2 doit reproduire la photo en hauteur publiée dans l'article « Energie éolienne » de Wikipedia, et intitulée « Éolienne au premier plan d'une centrale thermique à Amsterdam, Pays-Bas »