

## L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

### 1. L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

C'est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif spécifique. Pendant des siècles, les moulins à vent ont fourni un travail mécanique utilisé pour faire tourner la meule à moudre le grain, pomper l'eau pour l'irrigation, actionner les scieries etc. Une des utilisations les plus typiques a été l'assèchement des polders hollandais. Maintenant l'énergie éolienne s'oriente plus vers la production d'électricité, ce qui élargit son domaine d'application, mais qui demande au système de production électrique à s'adapter à cette production intermittente.

### 2. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET ORGANISATION

L'hélice fait tourner un générateur électrique par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse.

La puissance d'une éolienne est fonction de la surface balayée par l'hélice et de la vitesse du vent.

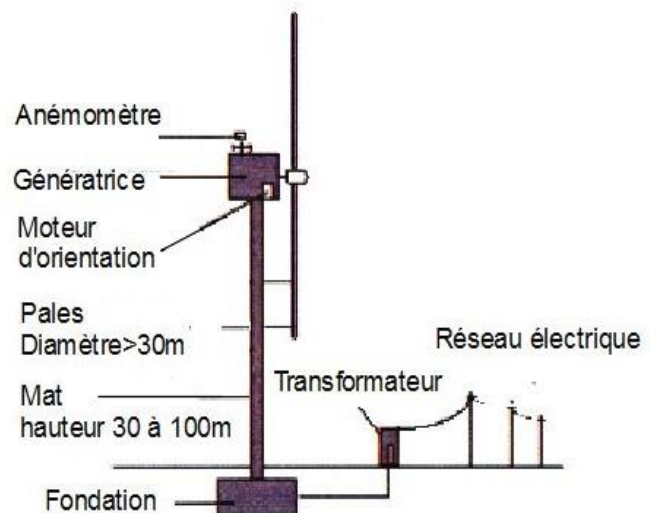
Pour produire le maximum d'énergie, les éoliennes (ou aérogénérateur) doivent être en permanence face au vent ce qui est réalisé soit par un gouvernail situé à l'arrière, soit par un « servomoteur » commandé par une petite girouette donnant la direction de vent.

On distingue deux types d'éoliennes : les petites éoliennes, jusqu'à quelques kW pour l'électrification de sites isolés, et les éoliennes de puissance de plusieurs MW qui sont en général regroupées en batteries et raccordées au réseau électrique.

Or une éolienne ne fonctionne que lorsque le vent souffle et il est actuellement très difficile et excessivement coûteux de stocker l'électricité.

Un aérogénérateur ne peut donc être utilisé comme seule source d'énergie. Il faut prévoir une autre source complémentaire qui, pour les éoliennes isolées de faible puissance, est en général un générateur du type groupe électrogène.

Les éoliennes de puissance sont regroupées dans des parcs d'éoliennes et reliées au réseau électrique. Ceci présente l'avantage de réduire la longueur des connexions et d'assurer une bonne gestion de la puissance d'appoint fournie au réseau. C'est le réseau qui assurera la gestion de la production et fera appel, si besoin, à d'autres moyens de production (hydraulique et plus généralement turbines à gaz)



### 3. PERFORMANCES ET DISPONIBILITÉ

Les éoliennes modernes commencent à fonctionner avec un vent de l'ordre de 15 km/h (4,5 m/s) en dessous duquel il est difficile d'assurer une bonne régulation.

A partir de 40 km/h (11 m/s), la vitesse de rotation est stabilisée pour pouvoir fournir un courant de bonne qualité immédiatement utilisable.

C'est particulièrement vrai pour les éoliennes raccordées au réseau qui doivent fournir un courant avec une fréquence constante quelle que soit la vitesse du vent. Ceci est obtenu en régulant la vitesse de rotation grâce à l'orientation des pales.

Lorsque les vents atteignent une vitesse de 90 km/h (25 m/s), les pales sont « mises en drapeau » pour éviter la destruction de la machine.

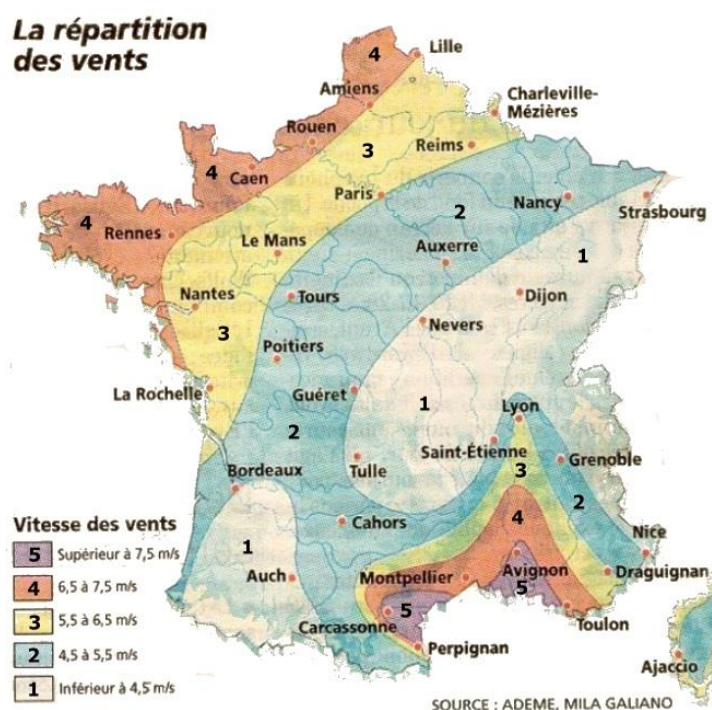
En effet, à grande vitesse, le phénomène de précession gyroscopique crée des contraintes pouvant entraîner des dégâts sur les pales et les mécanismes.

Afin de récupérer le maximum d'énergie il faut :

- avoir la plus grande surface possible balayée par l'hélice (400 watt/m<sup>2</sup> à la puissance max). Le diamètre des hélices des machines de puissance est fréquemment compris entre 30 et 60 m, soit des puissances crêtes de l'ordre de l'ordre du MW
- situer les machines dans les endroits venteux (en mer et bord de mer, sommet de collines, couloirs venteux pour bénéficier de l'effet Venturi) ; la puissance est proportionnelle au cube de la vitesse du vent
- situer les hélices en haut d'un mât de façon à s'affranchir de l'effet de freinage du vent au niveau du sol (plus de 120 m pour les grosses machines)
- garder un intervalle important entre deux machines pour éviter les pertes de rendements par des turbulences induites.

Les sites éoliens terrestres intéressants en France sont d'abord la façade ouest des côtes de la Manche et de l'Atlantique soumise aux vents d'ouest forts et dominants, la vallée du Rhône avec le Mistral et le Sud-Ouest de la côte méditerranéenne soumis à la Tramontane.

La carte des vents ci-dessous donne la répartition moyenne des vents sur l'ensemble du pays.



**Figure 1 : Carte des vents**

Pour les éoliennes maritimes, les sites retenus sont, le long des côtes de la Manche entre St Brieuc et le Tréport et sur la côte atlantique entre St Nazaire et le Médoc en Gironde. Actuellement seuls les sites de Courseulles, Fécamp, St Brieuc et St Nazaire sont sélectionnés pour une production entre 2020 et 2030.

Suivant la loi de Betz, une éolienne ne peut récupérer que 60 % de l'énergie reçue. De plus, si on prend en compte l'irrégularité du vent en intensité et en direction, on peut considérer que le facteur de charge est compris entre 12 et 25 % pour les éoliennes terrestres, ce coefficient pouvant atteindre 40 % pour les éoliennes maritimes (voir définition au §4).

L'amélioration de la technologie permet maintenant de construire des aérogénérateurs de forte puissance (jusqu'à 8 MW). Organisées en parc éolien et pour des raisons de sillage tourbillonnaire, ces machines doivent être espacées d'une distance de l'ordre de 7 fois le diamètre de l'hélice dans le sens du vent et 4 fois dans l'axe perpendiculaire au vent ; ainsi la surface utilisée par le MW éolien est très importante (# 10 MW/km<sup>2</sup>) par rapport à celle occupée pour toutes les autres énergies, mis à part le solaire évidemment.

#### 4. PROBLÈME DE L'INTERMITTENCE DE LA SOURCE D'ÉNERGIE

La disponibilité d'une machine se traduit par son facteur de charge ou facteur d'utilisation qui est le rapport entre l'énergie électrique effectivement produite sur une période donnée et l'énergie qu'elle aurait produit si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant la même période.

Pour les éoliennes, le facteur de charge est souvent assimilé au *rendement global* qui est le produit du rendement mécanique, du rendement électrique et du rendement aérodynamique, facteur principal sur une longue période. En France le taux de charge dépend de la situation géographique.

Pour l'éolien terrestre<sup>1</sup>, il varie de 19 % en Bourgogne à 31 % en Languedoc-Roussillon, la valeur moyenne installée en France se situant à 23 %.

La carte de la figure 2 donne, par région, en valeur moyenne :

- la puissance installée
- l'énergie produite
- le facteur de charge.

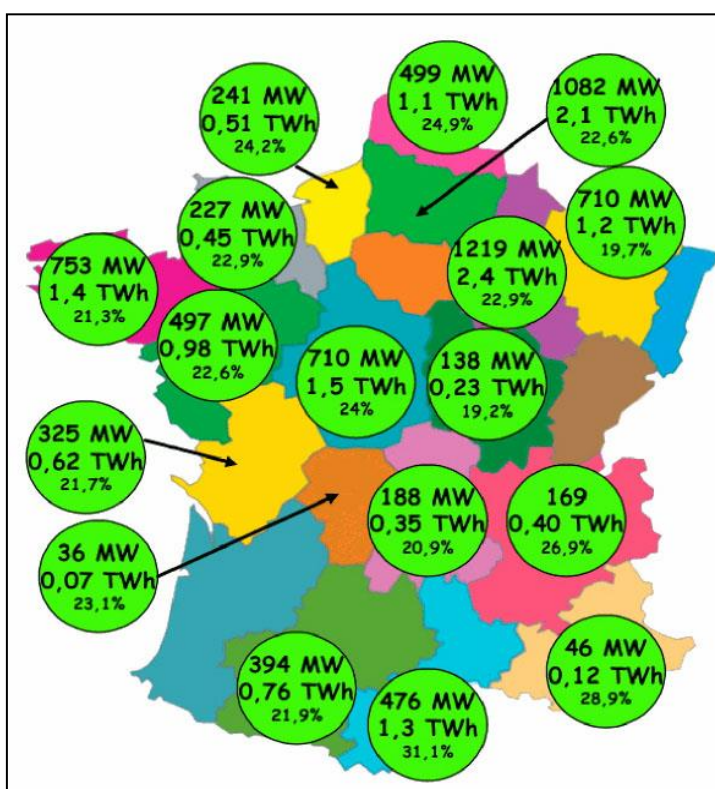


Figure 2 : Carte des performances de l'éolien terrestre

En réalité, une machine tourne près de 70 % du temps mais à une puissance inférieure à la puissance maximale, dite puissance installée (quand la vitesse du vent baisse d'un facteur 2, la puissance diminue d'un facteur 8).

Pour simplifier les estimations on considèrera, qu'en France, la puissance moyenne globale pour l'éolien terrestre correspond à 25 % de la puissance installée, et pour l'éolien maritime à 40 %.

De plus, le vent souffle de façon très intermittente, variable en durée et n'importe quand en heures, jours et saisons.

La disponibilité aléatoire de cette énergie n'est pas compatible avec l'ajustement instantané production/consommation que l'on exige de l'électricité.

Il est donc nécessaire de faire appel à d'autres sources, soit stockées, soit rapidement mises en œuvre.

Pour les utilisateurs indépendants ou les petits réseaux autonomes, l'énergie est fournie par la source principale classique qui fonctionnera les ¾ du temps, l'éolienne n'apportant qu'une énergie d'appoint.

La régulation est relativement aisée entre les deux sources.

Dans le cas de la connexion à un réseau électrique, le problème est plus complexe. A chaque instant (fraction de seconde) l'énergie électrique fournie au réseau par l'ensemble des générateurs en service doit être strictement

<sup>1</sup> Irlande 29%, Portugal 26%, Espagne 24%, Allemagne 17%

égale à l'énergie, fluctuant en permanence, de la consommation de centaines de millions d'appareils, lampes, moteurs et autres équipements ...

L'énergie électrique consommée en France varie dans le rapport 1 à 2 entre les moyennes d'été et d'hiver, dans le rapport 1 à 4 entre minuit au mois d'août et 6h du soir en décembre. Cela signifie qu'au moment des pointes de consommation, lorsque l'on fait appel à tous les moyens de production, l'énergie éolienne n'est pas forcément disponible. Il faut faire appel à d'autres sources.

Afin de répondre en permanence aux besoins, il est nécessaire de disposer d'une capacité principale de production (française ou étrangère) couvrant la totalité de la demande.

L'éolien doit être considéré comme une source secondaire, permettant d'économiser le plus possible les combustibles fossiles et ainsi réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Cette production électrique intermittente et aléatoire peut intervenir à des moments où l'on n'en a pas besoin, le surplus d'énergie peut alors être utilisé pour faire du stockage indirect, le vent n'étant pas stockable.

Quelques exemples de stockage :

- stocker l'énergie sous forme de gaz comprimé<sup>2</sup>
- stocker de l'eau par pompage/turbinage (STEP)<sup>3</sup>
- fabriquer de l'hydrogène par hydrolyse de l'eau (moteurs à hydrogène, piles à combustible)
- stocker l'énergie sous forme électrochimique (batterie NaS de 30 MW).

## 5. INFLUENCE DES ÉOLIENNES SUR L'ENVIRONNEMENT

Ce sujet est source de polémique entre les partisans et détracteurs de l'éolien. Nous ne ferons ici que soulever le problème sans traiter le fond.

Il touche essentiellement 3 thèmes : l'aspect esthétique et la dégradation du paysage, la santé et le bruit, l'impact sur la faune et les oiseaux.

Il est incontestable qu'à puissance égale l'emprise au sol de l'éolien est considérable par rapport à la plupart des autres sources d'énergie. Compte tenu des distances à respecter pour des problèmes de sillage (§3) la densité de puissance nominale d'un champ d'éoliennes terrestres, dans une zone favorable, est de l'ordre de 10 MW par km<sup>2</sup> soit une production annuelle de 20 GWh par km<sup>2</sup>. Ceci ne rend pas le sol inutilisable pour une exploitation agricole mais le bruit généré peut avoir un impact sur la faune locale avec perte de l'habitat pour certaines espèces.

Il est bien sûr souhaitable vis-à-vis de l'homme que les parcs éoliens soient situés loin des habitations. Pour les installations individuelles ou les petites installations locales, elles doivent respecter la législation sur les bruits sans doute plus difficile à appliquer en milieu rural, caractérisé par son calme. Pour la vie aviaire on constate effectivement quelques dégâts. Mais sont-ils plus importants que ceux causés par les lignes électriques ?

Pour les éoliennes maritimes l'inconvénient est lié à la restriction des zones de pêche.

L'aspect esthétique et la dégradation du paysage sont des problèmes très subjectifs laissés à l'appréciation de chacun. Il est toutefois souhaitable de trouver le meilleur compromis entre les endroits énergétiquement rentables et les zones de moindre intérêt sur le plan du patrimoine.

## 6. LES NOUVEAUX CONCEPTS

Devant le rendement modeste de ce type de machine, les recherches sur l'amélioration des performances se poursuivent.

Deux nouveaux concepts semblent être porteurs de progrès : les éoliennes à effet Magnus et les éoliennes carénées développées par la société Stormblade. Le but de ces nouvelles machines est d'élargir la plage de fonctionnement pour atteindre régulièrement un facteur de charge de 30%.

On trouvera dans l'encart en grisé ci-dessous, quelques détails sur le fonctionnement et les avantages de ces différentes machines.

<sup>2</sup> Les Allemands font des essais de stockage de gaz sous pression dans des anciennes mines de sel.

<sup>3</sup> En France, la capacité de stockage dans les barrages de montagne est quasiment saturée

L'effet Magnus a été découvert par Heinrich Gustav Magnus (1802-1870), physicien allemand. Ce n'est rien d'autre que l'effet que l'on donne à une balle de tennis ou un ballon de football lors de la frappe. En plaçant un cylindre en rotation dans un flux d'air il se crée une force induite, la portance, perpendiculaire à ce flux. Cette portance est proportionnelle à la vitesse de rotation qu'on impose au cylindre et à celle du vent d'où une maîtrise parfaite de la puissance instantanée pour des vitesses de vent situées entre de 30 et 100 km/h. Des cylindres en rotation remplacent les pales. Leur vitesse de rotation est voisine de 3000 tours/min. Ce projet ne s'applique pour le moment qu'aux éoliennes de petite puissance et les avantages demandent à être évalués (système développé par Mekaro Akita Co au Japon et « Projet étudiant » de génie physique financé par EDF et ANVAR).

La « Stormblade turbine » est basée sur le principe de la turbine du moteur à réaction, ce qui permet d'augmenter la vitesse de rotation du rotor sans avoir à subir le phénomène de précession gyroscopique et de dépasser ainsi la limite physique de la loi de Betz. La plage de vitesse des vents utilisables pourra ainsi doubler, de 11 km/h à 193 km/h, ce qui présente l'avantage d'avoir une production d'électricité plus continue et une puissance maximale plus élevée puisque celle-ci est proportionnelle au cube de la vitesse du vent. Par contre, la puissance produite est aussi proportionnelle à la surface balayée par les pales et globalement la puissance délivrée reste inférieure à celles des éoliennes conventionnelles. L'avantage demeure sa production plus régulière ; les tests sur prototype donnent un rapport d'efficacité voisin de 3 par rapport aux éoliennes à pales.

## 7. SPÉCIFICITÉ DES ÉOLIENNES MARITIMES

Les éoliennes maritimes sont implantées en général au large des côtes sur les hauts fonds marins. La profondeur d'eau, qui conditionne l'éloignement de la côte est de 25 à 45 m maximum. Pour les eaux profondes (de 50 à 200 m) se développent des projets d'éoliennes flottantes.

### 7.1. AVANTAGES

Les gisements éoliens maritimes sont quantitativement meilleurs que les terrestres car le vent est en général plus fort et plus régulier avec une rugosité de la surface de l'eau beaucoup plus faible que celle de la terre. Ceci conduit à un facteur de charge de l'ordre de 40 %.

Ces éoliennes, implantées au large sur le domaine public maritime ont en général moins d'impact sur le paysage et peuvent ainsi être beaucoup plus importantes (6 MW).

### 7.2. INCONVÉNIENTS

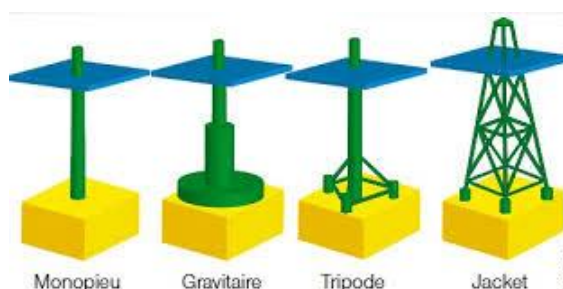
L'installation d'éoliennes en mer est nécessairement beaucoup plus coûteuse car elle engendre la mise en œuvre de techniques spécifiques aux travaux en mer et sous-marins (étude des fonds marins, corrosion, résistance aux vents, aux vagues et aux courants, fixation sur le fond marin...). A ceci se rajoute le problème du raccordement électrique coûteux et fragile (liaison en courant continu pour limiter les pertes en ligne).

Le coût d'exploitation est lié essentiellement à la maintenance des machines qui va nécessiter la mise en œuvre de moyens spécifiques et la nécessité d'avoir des machines d'une grande fiabilité pour limiter ces frais.

### 7.3. LES DIFFÉRENTES TECHNIQUES

**Les éoliennes implantées représentent actuellement un parc de plus de 2000 machines installées en Europe** soit une puissance crête installée de plus de 6.5 TWc.

Elles sont fixées suivant différentes techniques sur les hauts fonds des plateaux continentaux.



Alstom a installé le prototype de l'Haliade 150 au large d'Ostende (Belgique). Cette éolienne offshore d'une capacité de 6 mégawatts (MW) avec un rotor de 156 m de diamètre est la plus puissante du monde.

En France, elle équipera les champs de Courseulles-sur-Mer (Calvados), Fécamp (Seine-Maritime) et Saint-Nazaire (Loire-Atlantique),

St Nazaire avec 80 éoliennes devrait avoir une production annuelle de 1700 GWh



**Eolienne Haliade 150**

### **Les autres types d'éoliennes sont dits à fondation flottante.**

Cette technique va permettre d'élargir la zone d'exploitation de l'énergie éolienne en donnant accès à des zones plus profondes ces machines étant simplement ancrées au fond sous-marins.

Les différents projets sont actuellement en phase de développements technologiques<sup>4</sup>. Un problème significatif pour ces techniques est l'acheminement de la production vers le continent.



**Prototype Windfloat au large de Porto (Portugal)**

## **8. COÛT D'UNE INSTALLATION ET RENTABILITÉ**

Le prix de revient du kWh éolien est fonction de trois facteurs :

- l'investissement initial
- la fiabilité et la durée de vie de l'équipement
- la régularité du vent sur le lieu d'implantation

Actuellement, pour le terrestre, l'investissement initial est de l'ordre de 1500 € par kW installé. Il englobe le coût des études, des matériels, du raccordement, de l'installation, des frais de mise en route soit 1,5 M€/MW.

Ce matériel étant soumis à de fortes contraintes, la durée de vie moyenne est estimée à 20 à 25 ans avec changement des pales à mi-durée de vie (donnée ADEME).

Pour l'éolien maritime le prix serait de l'ordre de 3 à 3,3 M€/MW sur la base des projets en cours.

Pour l'installateur la rentabilité repose sur les performances donc de l'implantation de chaque machine et sur le prix de rachat du kWh. Actuellement le prix est garanti pendant 15 ans.

Pour le terrestre il est fixé à 8,2 c€/kWh pendant 10 ans et dégressif par la suite.

Pour le maritime il est de 13 c€/kWh pendant 10 ans puis dégressif.

Ces prix sont à comparer au prix du nucléaire qui est actuellement de 5,6 c€/kWh.

Cette aide au rachat de l'électricité est financée par le CSPE (Contribution au Service Public d'Electricité).

Le kWh éolien est donc rentable pour le producteur qui redoit une taxe professionnelle aux communes ou aux communautés de communes, au département et à la région. Pour une éolienne de 1 MW, cela représente par an environ 6000 € pour la commune, 6000 € pour le département et 1200 € pour la région.

## **9. INTÉRÊT ET LIMITATION DE L'ÉOLIEN**

La production électrique était de 550 TWh en 2010 et devrait passer à 575 TWh en 2030 (Voir [Fiche GASN N°4](#)).

Le scénario 50 % de nucléaire conduira alors à 56 TWh d'éolien et photovoltaïque et 60 TWh d'hydraulique représentant les 20 % d'énergie renouvelable souhaitée.

Mais le besoin en 2030 et l'intermittence de ces moyens de production nécessitera de faire fortement appel aux énergies fossiles (turbines à gaz) avec une production de CO<sub>2</sub> de l'ordre de 110 Mt pour 39 actuellement.

<sup>4</sup> Deux Projets sont actuellement développés par les Pôles de Compétitivité Mer de Bretagne, Paca et DCNS

Si l'on ne veut pas, dans l'avenir, augmenter fortement la production de gaz à effet de serre, il sera nécessaire de trouver un bon équilibre entre les différentes sources d'énergie.

Ce compromis pourrait se situer autour de 72 à 75 % de nucléaire et 15 % de renouvelable.

Pour les éoliennes maritimes, qui représentent un meilleur facteur de charge, le problème se situe au niveau des investissements et du coût de la maintenance indispensables compte tenu des contraintes sévères auxquelles seront soumis ces matériels.

La durée de vie de ces installations sera sans doute limitée.

A titre de comparaison et uniquement sur plan investissement de base, pour deux projets d'actualité l'éolien maritime aura une production électrique de l'ordre de 20 % plus faible que l'EPR pour un coût de construction de 20 % plus cher (Voir [Fiche GASN N°4](#)).