

Énergies renouvelables | Énergies éoliennes

Décryptages

Bateaux à voiles, moulins à vent,… L’énergie éolienne est exploitée par les hommes depuis des siècles. Grâce aux progrès technologiques, elle permet aujourd’hui de produire de l’électricité « verte » sans utiliser de ressources fossiles. Zoom sur son fonctionnement et ses perspectives de développement et les défis qu’il reste à surmonter.

- L'énergie éolienne en quelques mots
- Comment fonctionne une éolienne ?
- De l'éolien terrestre à l'éolien en mer
- L'éolien en mer, posé ou flottant ?
- Un potentiel immense, sur terre et sur mer
- L’éolien en mer, un futur eldorado pour l’Europe et la France ?
- Les atouts majeurs de l’éolien
- Les défis de l'éolien



L’ÉNERGIE ÉOLIENNE EN QUELQUES DÉFINITIONS

Le mot « éolienne » vient d'Éole, nom du dieu des vents dans la mythologie grecque.

Une éolienne est une machine permettant de **transformer l’énergie cinétique du vent en énergie mécanique**, elle-même convertie en électricité. Lorsque plusieurs éoliennes sont installées sur un même site, on parle de « **parc** » ou de « **ferme** » d’éoliennes.

Les premières éoliennes servant à produire de l’électricité datent des **années 1970**. Aujourd’hui, en France, l’éolien est la **2e source d’électricité renouvelable** la plus utilisée après l’énergie hydraulique. Il fournit plus de **8 % de la consommation nationale d’électricité (8,3% en 2022, soit 37.9 TWh).** .

> **En France, l’énergie éolienne fournit plus de 8 % de la consommation nationale d’électricité.**

COMMENT FONCTIONNE UNE ÉOLIENNE ?

L’énergie éolienne est produite grâce à la **force exercée par le vent** sur des **pales fixées à un rotor** .

Dans sa configuration la plus commune, le rotor comporte **trois pales** tournant autour d’un axe horizontal. Le diamètre qu’elles balaient varie de 80 à plus de 200 mètres. Plus les pales sont longues, plus la capacité de production d’électricité est importante.

En tournant, **le retor entraîne un générateur qui produit de l'énergie électrique**. Dans les éoliennes de conception classique, le générateur nécessite une vitesse de rotation entre 1 000 et 2 000 tours par minute, alors que les pales tournent plus lentement (entre 5 et 25 tours par minute). Dans ces éoliennes, un multiplicateur (ou boîte de vitesse) est installé entre le rotor et le générateur pour augmenter la vitesse de rotation. Il existe aussi des machines de conception plus récente, à entraînement direct, dont les générateurs fonctionnent avec une vitesse de rotation variable (de 5 tours à 2000 tours par minute) et qui n'utilisent pas de multiplicateur. L'ensemble constitué par le multiplicateur et le générateur forme la **nacelle**.



Les composants d'une éolienne

La nacelle est installée au sommet d'un **mât** mesurant entre 50 et plus de 200 m de haut. Un système permet de l'orienter pour que le rotor et les pales soient toujours face au vent. Les éoliennes fonctionnent généralement à des vitesses de vent comprises généralement entre 10 et 90 km/h. Au-delà de cette vitesse maximum, elles s'arrêtent automatiquement pour éviter tout accident.

L'énergie électrique produite par le générateur est acheminée le long du mât via des câbles jusqu'à un **transformateur**, avant d'être **injectée dans le réseau électrique** par des câbles souterrains.

DE L'ÉOLIEN TERRESTRE À L'ÉOLIEN EN MER

Aux premières éoliennes construites à terre ont succédé les éoliennes en mer. En effet, l'éolien terrestre présente **plusieurs limitations** :

Le **potentiel de l'énergie éolienne terrestre est toutefois limité par** :

- une **puissance maximale** qui ne dépasse que rarement 3 à 4 MW,
- une **acceptation sociétale** parfois difficile (nuisances visuelles et sonores, impact sur la faune et la flore),
- des conflits d'usage qui compliquent la disponibilité des sites.

Au large des côtes, les vents sont plus puissants et plus réguliers qu'à terre, ce qui explique **l'envol de l'éolien en mer** depuis plusieurs années. **Plus grandes et plus puissantes** (**6 à 10 MW**, voire **18 MW** pour certains modèles récents), **les éoliennes installées en mer** fournissent **plus d'énergie par machine** que les éoliennes terrestres. Elles ont un impact limité sur le paysage, ce qui permet de déployer des parcs de taille plus importante, avec un plus grand nombre d'éoliennes. Les coûts de fabrication, d'installation et de production sont plus élevés qu'à terre mais ils sont amenés à diminuer d'année en année.


Parc éolien en mer

L'ÉOLIEN EN MER, POSE OU FLOTTANT

Afin d'ancrer les éoliennes au fond de la mer, on distingue, selon la profondeur d'eau :

- **l'éolien posé** : **jusqu'à 60 mètres de profondeur d'eau**, les éoliennes sont fixées au sol marin. Les technologies de l'éolien offshore posé sont bien maîtrisées, mais la réduction des coûts d'opération requiert des turbines plus grandes et plus puissantes. En Europe, le Royaume-Uni est le premier pays en termes de capacité installée, suivi de l'Allemagne, des Pays-Bas et du Danemark ;

- l'**éolien flottant** : **au-delà de 60 mètres de profondeur**, l'implantation dans le sol devient trop coûteuse et difficile à mettre en œuvre. Les éoliennes sont donc reliées à un support flottant à la surface de l'eau ou juste en dessous de celle-ci. Elles peuvent être implantées plus loin des côtes et bénéficier ainsi de vents plus puissants et plus réguliers. Le support flottant est ancré au fond de la mer grâce à des câbles. Plusieurs types de flotteurs sont utilisables : il peut s'agir d'une barge, d'une colonne d'acier ou de plusieurs colonnes d'acier, etc. Ces structures doivent

supporter les aléas de la mer et leur coût de fabrication doit être maîtrisé.

Le saviez-vous ?

Si la production d'électricité à partir d'éoliennes date de la fin du 19e siècle, c'est dans les années 1970, à la suite du premier choc pétrolier, que les éoliennes terrestres prennent une ampleur nouvelle, et notamment au Danemark. C'est ce même pays qui a installé **la première éolienne en mer**, en 1991. En 2021, on dénombrait en Europe 116 parcs en mer dans 12 pays, avec un total de plus de 5 000 turbines. Par ailleurs, **l'éolien offshore flottant** fait une percée en Europe avec l'installation, au large de l'Ecosse, de deux parcs, celui de HyWind d'Equinor (30 MW) en 2017 et celui de Kincardine (50 MW) en 2021. Le nouveau parc d'Equinor, Hywind Tampen, sera à même de battre un nouveau record, avec 88 MW de capacité totale. Sa production a débuté à la fin de l'année 2022. Quatre parcs pilotes sont seront bientôt opérationnels en France, dont celui de Provence Gand Large d'une capacité de 25MW pour lequel IFPEN a participé au dimensionnement des flotteurs. Sa mise en service est prévue au second semestre 2023.

UN POTENTIEL IMMENSE, SUR TERRE ET SUR MER

Le **potentiel éolien terrestre mondial**, d'après la World Wind Energy Association (WWEA), permettrait de fournir **près de 200 000 TWh d'énergie électrique par an**, en supposant que les éoliennes fonctionnent 2100 heures dans une année.
Une étude des universités du Sussex (Angleterre) et d'Aarhus (Danemark) estime que **le potentiel terrestre de l'Europe** (incluant la Russie et la Turquie) peut produire **110 000 TWh par an**. Il faudrait installer 11 millions d'éoliennes supplémentaires, réparties sur 4,9 millions de kilomètres carrés.

L'éolien en mer

- **420 000 TWh**

C'est **le potentiel éolien en mer mondial annuel**, d'après l'Agence Internationale de l'Energie, ce qui permet de couvrir **18 fois la demande électrique mondiale** (11 fois celle prévue en 2040). **En Europe, le potentiel éolien en mer est de 34 000 TWh par an**, avec une demande qui ne dépasse pas 3 000 TWh. **En France**, d'après France Energie Eolienne, la ressource théorique pourrait fournir par an **168 TWh** pour **l'éolien posé** et **294 TWh** pour **l'éolien flottant**. Le total est légèrement supérieur à l'énergie consommée en France en 2020 d'après RTE (460 TWh).

L'ÉOLIEN EN MER, UN FUTUR ELDORADO POUR L'EUROPE ET LA FRANCE ?

L'Europe a une longueur d'avance en termes de production d'électricité en mer et notamment le Royaume-Uni, champion mondial de l'éolien en mer.

La Commission Européenne ambitionne de multiplier par cinq les capacités actuelles d'ici 2030 et par vingt-cinq d'ici 2050.
En France, les projets prévus par la Programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE) visaient une capacité installée d'éolien en mer, **de 2,4 GW en 2023 et environ 5 GW en 2028**. Si l'objectif fixé en 2023 ne sera pas complètement atteint, l'ambition portée par les pouvoirs publics reste forte comme en témoigne le "Pacte Éolien en mer" signé en mars 2022 dans le but de porter la capacité installée à 18 GW en 2035 et à 40 GW en 2050. Pour suivre l'avancée des projets en cours, le Ministère de la Transition Ecologique a mis en place le site très pédagogique Eoliennes en mer en France.

LES ATOUTS MAJEURS DE L'ÉOLIEN

- L'éolien permet de diversifier les ressources énergétiques. Implanté sur le territoire national, il contribue à l'indépendance énergétique et à la sécurisation d'une partie des approvisionnements.
- L'énergie éolienne est **renouvelable** et **non polluante**. Elle contribue à une **meilleure qualité de l'air** et à **la lutte contre le réchauffement climatique** car **l'électricité est produite sans émission de CO_2**. La fabrication et la fin de vie des installations entraînent peu d'émissions de CO_2. Par ailleurs, l'électricité peut être produite à proximité des lieux de consommation.
- Après usage, les sites peuvent être remis dans leur état d'origine et les matériaux peuvent être réutilisés.

LES DEFIS DE L'ÉOLIEN

Malgré ses atouts, l'éolien présente certains défis, parmi lesquels l'intermittence, l'acceptation sociétale, le renforcement des réseaux électriques, la tension sur les matières premières, la réduction des coûts et la minimisation des risques.

L'intermittence

L'énergie éolienne est **intermittente** : les pales ne fonctionnent que si le vent n'est ni trop faible ni trop fort. En cas de pénurie de vent, l'énergie électrique doit être fournie d'autres sources de production, idéalement renouvelables comme des centrales hydroélectriques, à biomasse ou géothermiques.
A contrario, si la production d'électricité est trop importante, des systèmes de stockage d'énergie peuvent être utilisés, tels que des batteries géantes, des systèmes de pompage, de stockage gravitaire ou des volants d'inertie. Il est aussi envisagé de produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau (power-to-gaz).

Acceptation sociétale

Une part de plus en plus importante de la population comprend l'intérêt de développer l'énergie éolienne. Néanmoins, des efforts doivent continuer à être déployés pour mieux évaluer **les impacts des éoliennes**, en particulier sur la faune (oiseaux, chauve-souris, etc.). En mer, les conflits d'usage

avec les pêcheurs et les plaisanciers doivent être évalués pour chaque nouveau projet d'implantation.

Renforcement des réseaux électriques

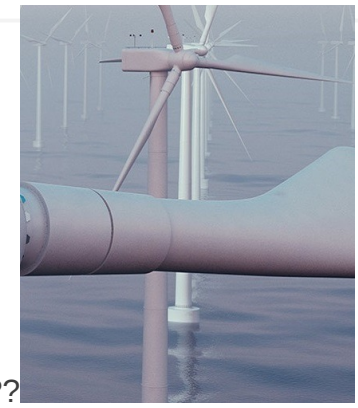
Les réseaux électriques doivent être adaptés pour transporter des quantités toujours plus importantes d'électricité. Des investissements conséquents seront nécessaires.

Tension sur les matières premières

Le déploiement à grande échelle des éoliennes va **accroître fortement la demande en matières premières** et notamment en **métaux** comme le cuivre ou certaines terres rares nécessaires à leur fabrication et leur raccordement. **Cette pression sur les ressources** fait l'objet d'études prospectives, notamment à IFPEN qui a notamment participé à un projet ANR pour mieux évaluer la dépendance aux métaux qui pourrait résulter de la transition énergétique. Le recyclage des métaux et des autres composants des éoliennes permettra en partie de satisfaire cette forte demande.

Réduction des coûts et minimisation des risques

En France, le coût de **l'éolien terrestre** est de **60–70 €/MWh,** celui de **l'éolien en mer posé** de **40–80 €/MWh** et celui de **l'éolien en mer flottant** moins mature **de 120-150 €/MWh**. Par comparaison, **le photovoltaïque** a un coût de **45 à 81 €/MWh** et le **nucléaire** de **43,8 à 64,8 €/MWh**. L'évolution des technologies devrait permettre **une baisse significative des coûts de l'éolien d'ici 2030,** notamment **sur l'éolien flottant**.
Pour réduire les coûts et les risques liés à l'éolien, des outils de modélisation et de prévision peuvent s'avérer très utiles et font l'objet de travaux de recherche, notamment à IFPEN. Ils permettent d'optimiser la répartition des éoliennes dans un parc, d'estimer l'énergie électrique produite, de prédire en temps réel les caractéristiques du vent incident (force, direction) et d'en tirer le meilleur parti, d'améliorer la productivité et la maintenance en détectant des défauts sur les éoliennes, etc.

??

IFPEN :
Nos expertises > **Énergies éoliennes**

POUR ALLER PLUS LOIN

Eoliennes en mer: goutte deau ou tsunami énergetique
Les éoliennes offshore ont-elles le vent en poupe ? - Science En Questions

Fil d'actualités

IFPEN

Actualités juin 2023

Eolien : IFPEN annonce la création de la société GreenWITS

Communiqués de presse

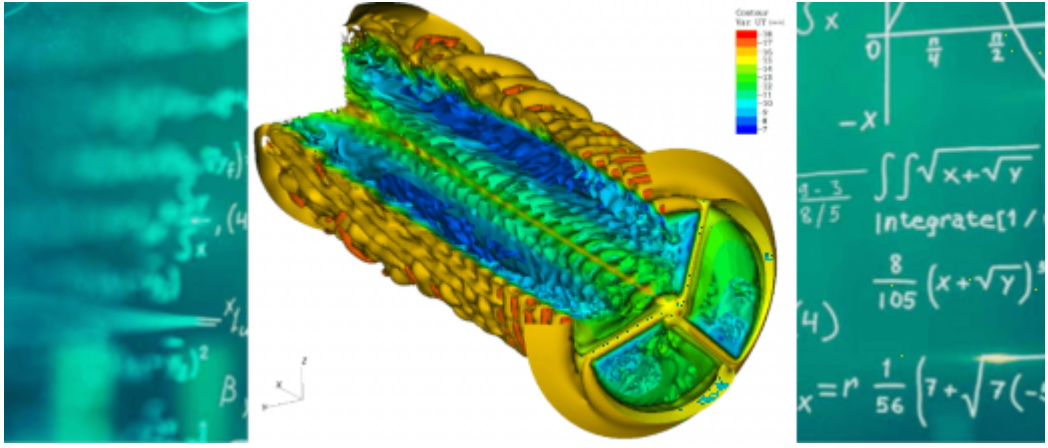


Innovation et industrie

Actualités juin 2023

L’éolien à IFPEN : quand le vent fait tourner la tête des chercheurs

Énergies renouvelables | Énergies éoliennes



Recherche fondamentale

Actualités septembre 2020

Energie éolienne : un nouvel outil numérique pour l’avenir de la filière

Énergies renouvelables | Énergies éoliennes

Sciences de l'ingénieur | Modélisation et simulation des systèmes

Énergie éolienne : transformer le vent en électricité

Lien vers la page web :