



Comprendre l'éolien

Réponses aux questions fréquentes
sur l'énergie éolienne



EOLISE

Table des matières

La place des énergies renouvelables électriques	3
Quelle est la part des énergies renouvelables électriques dans le monde ?	4
Quelle est la part des énergies renouvelables électriques en Europe ?	6
Quelle dynamique pour l'éolien en Europe ?	9
Quelle dynamique pour l'éolien en France ?	13
L'Allemagne ajoute-t-elle du charbon pour compenser son éolien ?	15
Quelle est la dynamique de l'éolien en Nouvelle-Aquitaine ?	18
Technique de l'éolien	24
Comment fonctionne une éolienne ?	25
Quel est le rapport entre la taille et la puissance d'une éolienne ?	29
Qu'est-ce que la courbe de puissance d'une éolienne ?	33
Le facteur de charge, c'est quoi au juste ?	36
Quel est le facteur de charge par type d'énergie ?	40
La variabilité de la production pose-t-elle un problème ?	42
Pourquoi cette éolienne ne tourne pas alors qu'il y a du vent ?	45
Impact écologique de l'éolien	48
Les éoliennes émettent-elles des gaz à effet de serre ?	49
Comment les éoliennes sont démantelées et recyclées ?	52
Le développement de l'éolien a-t-il un impact sur l'activité des centrales à charbon ou à fioul ? ...	55
Quel est l'impact de l'éolien sur l'extraction de terres rares ?	57
Quelle est la consommation électrique interne d'une éolienne ?	60
Réglementation de l'éolien	61
Quelle réglementation pour le démantèlement des fondations ?	62
Quelle est la distance réglementaire entre éoliennes et habitations ?	64
Que dit la réglementation sur le balisage lumineux ?	66
Sources	69

La place des énergies renouvelables électriques



Quelle est la part des énergies renouvelables électriques dans le monde ?

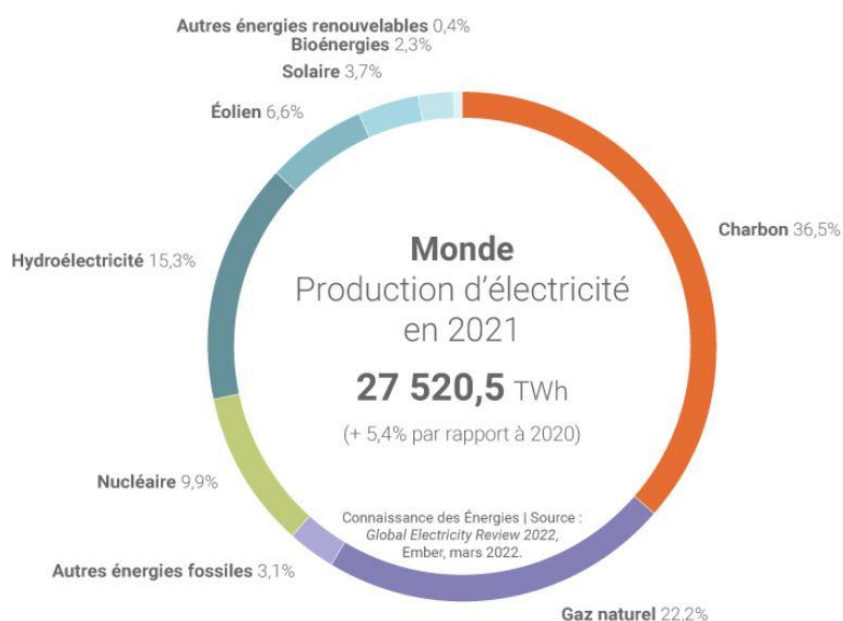
En résumé : A l'échelle mondiale, depuis une quinzaine d'années, la part des énergies renouvelables dans la production électrique croît de manière nette. Cette croissance est principalement portée par l'énergie éolienne et photovoltaïque. A l'inverse, le pétrole et le nucléaire tendent à diminuer, tandis que le charbon stagne et que le gaz augmente.

Les énergies renouvelables (ENR) électriques sont celles dont la source d'énergie est naturelle et se renouvelle rapidement sans qu'il soit nécessaire de puiser dans un stock fini. Cela exclut donc les énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz) et le nucléaire qui consomme de l'uranium. Les ENR électriques principales, qui se démarquent aussi par leur faible impact CO₂, sont l'hydraulique, l'éolien terrestre et en mer, le photovoltaïque et la biomasse.

Au niveau mondial depuis 1970, le charbon occupe une part stable dans la production électrique (un peu moins de 40 %) et reste la source principale de production d'électricité. Malgré son impact CO₂ conséquent, c'est une énergie peu chère dont les centrales sont simples à construire et à gérer. Les productions électriques issues du nucléaire et du pétrole diminuent fortement tandis que la part du gaz est stable. Les énergies renouvelables, principalement hydraulique, éolien et photovoltaïque, augmentent et couvraient environ 26 % du mix énergétique mondial en 2021.

Le développement des énergies renouvelables est donc en nette progression depuis une quinzaine d'année. La majorité des installations hydrauliques a été installée le siècle dernier et les sites potentiels restant pour les infrastructures électriques de grandes puissances se raréfient, en particulier dans les pays développés. C'est donc l'éolien et le photovoltaïque qui font augmenter la puissance du parc ENR mondial depuis le début des années 2000.

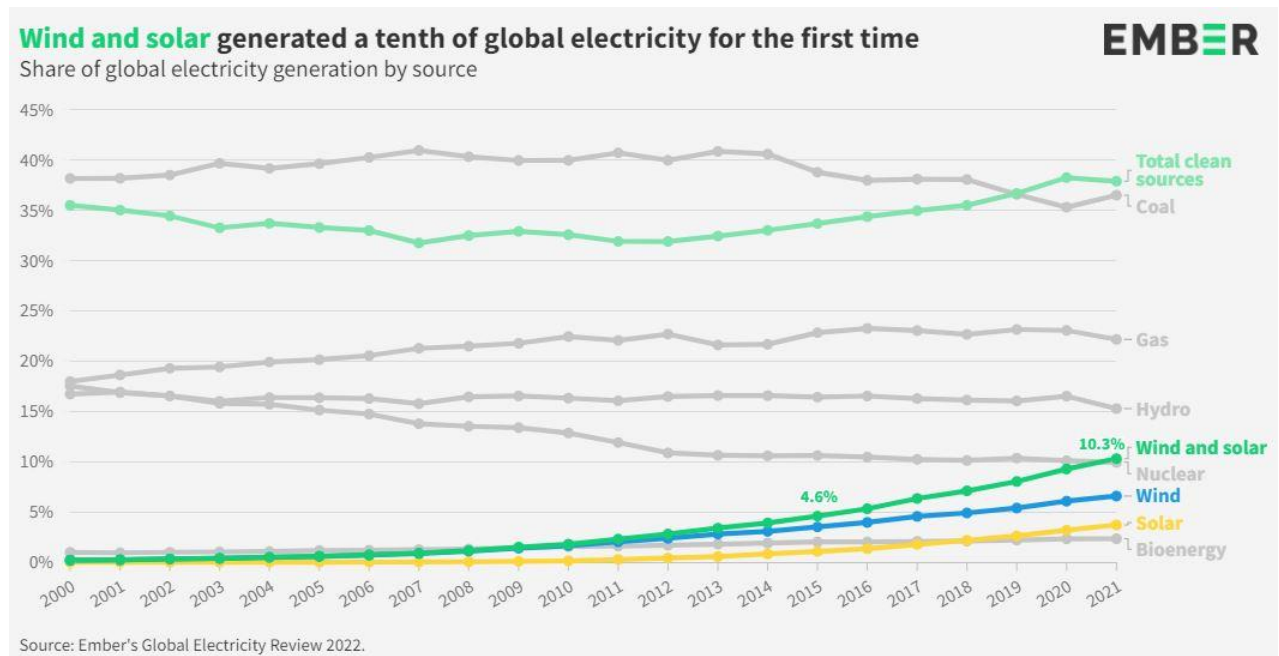
En 2021 le cumul de la production éolienne et photovoltaïque franchissait les 10 % du mix électrique mondial en dépassant la production nucléaire.



Source : [Site internet Connaissance des énergies](#) basé sur les chiffres de *Global Electricity review et Ember (mars 2022)*

On peut constater cette évolution sur le graphique suivant qui représente la part de la production électrique par filière :

Graphique d'évolution de la part de production d'électricité par source



Source : [Ember – Global electricity review 2022 \(03/2022\)](#)

*Voir section Traduction pour la traduction en français

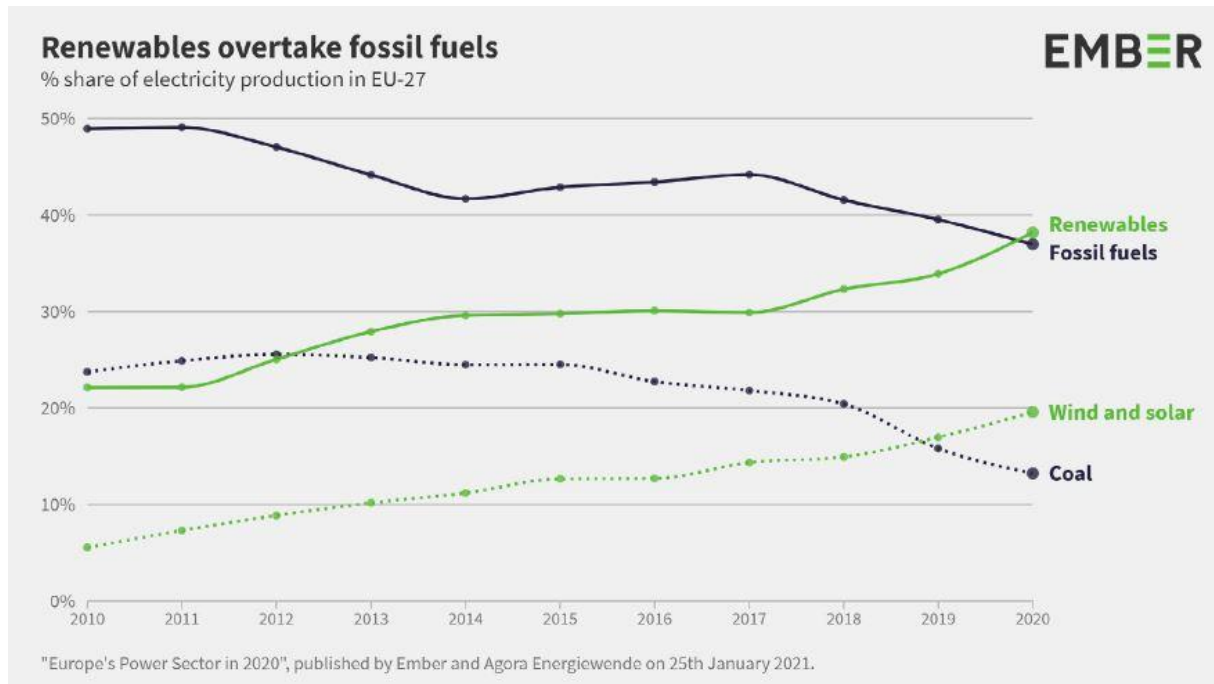
Le chiffre clé

10

L'éolien et le photovoltaïque représente plus de 10% de l'électricité produite dans le monde soit davantage que le nucléaire.

Quelle est la part des énergies renouvelables électriques en Europe ?

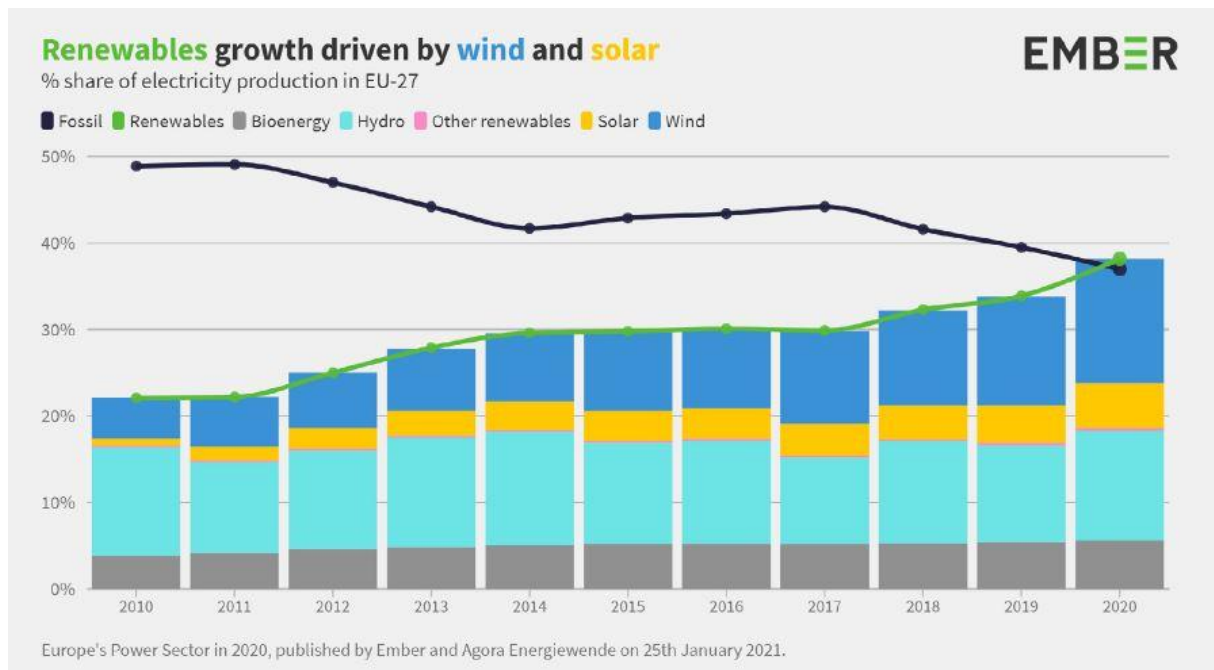
En résumé : L'Europe se distingue, à l'échelle mondiale, comme le continent où le développement des énergies renouvelables est le plus marqué. Alors que l'installation de moyens de production nucléaire, charbon ou gaz diminue, la hausse la plus nette vient du solaire et de l'éolien. Ainsi en 2020, la production renouvelable dépassait celles des énergies fossiles atteignant presque 40 %. L'éolien et le photovoltaïque représentent 20 % soit davantage que le charbon (13 %). La France qui dispose d'un parc nucléaire et hydraulique conséquent est en retard sur le développement de l'éolien et du photovoltaïque malgré son potentiel important.



Production d'électricité dans l'UE (par source d'énergie)

Source : [Ember & Agora – The European power sector in 2020 - p.4 \(01/2021\)](#)

En Europe, le développement des ENR électriques est plus rapide qu'au niveau mondial, grâce aux politiques européennes et au volontarisme de certains pays (Portugal, pays Scandinaves, Allemagne, Royaume-Uni). Les différences entre Etats sont particulièrement marquées par l'influence du potentiel propre à chaque pays pour les différentes sources d'énergie, mais également en fonction de la politique, des industries et de l'historique.



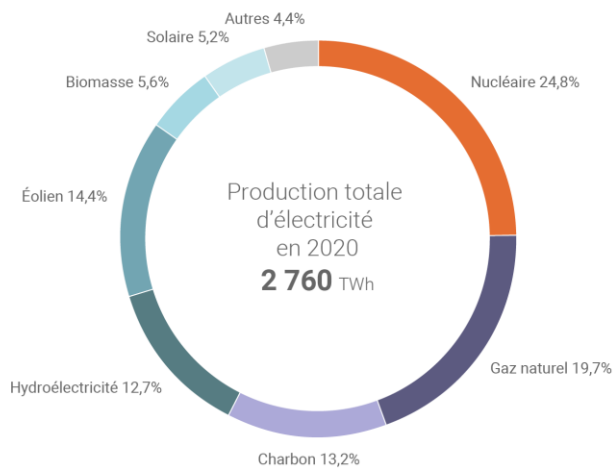
Production d'électricité renouvelable dans l'UE (par source d'énergie)

Source : [Ember & Agora – The European power sector in 2020 - p.7 \(01/2021\)](#)

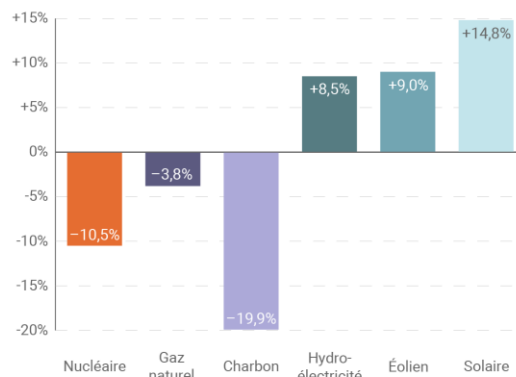
Le développement des énergies renouvelables est porté par l'éolien et le photovoltaïque alors que la bioénergie est stable et l'hydraulique varie chaque année selon l'hygrométrie.

En 2020, les énergies renouvelables représentaient 38 % de la production d'électricité en Europe. L'évolution de la production de 2019 à 2020 démontre une baisse des énergies fossiles et nucléaire au profit des énergies renouvelables.

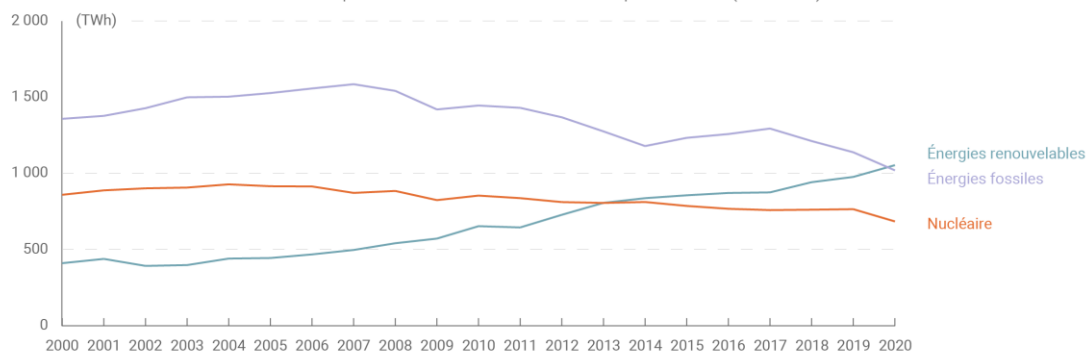
Union européenne à 27 Évolution de la production d'électricité



Évolution de la production en 2020 par rapport à 2019



Évolution des différentes filières productrices d'électricité depuis 2000 (UE à 27)



Connaissance des Énergies | Source : The European Power Sector in 2020, Ember & Agora Energiewende, janvier 2021.

Evolution de la production d'électricité dans l'Union européenne

Source : [Site internet Connaissance des énergies](#) basé sur les chiffres de Ember & Agora – The european power sector in 2020 (01/2021)

Depuis 2016, les nouvelles installations de moyens électriques sont pour plus de 80 % de la puissance des énergies renouvelables. L'Europe installe donc moins de 20 % de nouveau moyen de production fossile (principalement du gaz, le nucléaire étant absent).

« Malgré ces progressions, la part des énergies renouvelables reste, en 2018, en dessous de la trajectoire fixée par le plan national d'action en faveur des énergies renouvelables pour l'atteinte en 2020 des objectifs fixés par la directive européenne. » Commissariat général au développement durable – Datalab Les énergies renouvelables en France en 2018 – 09/2019

Le chiffre clé

38

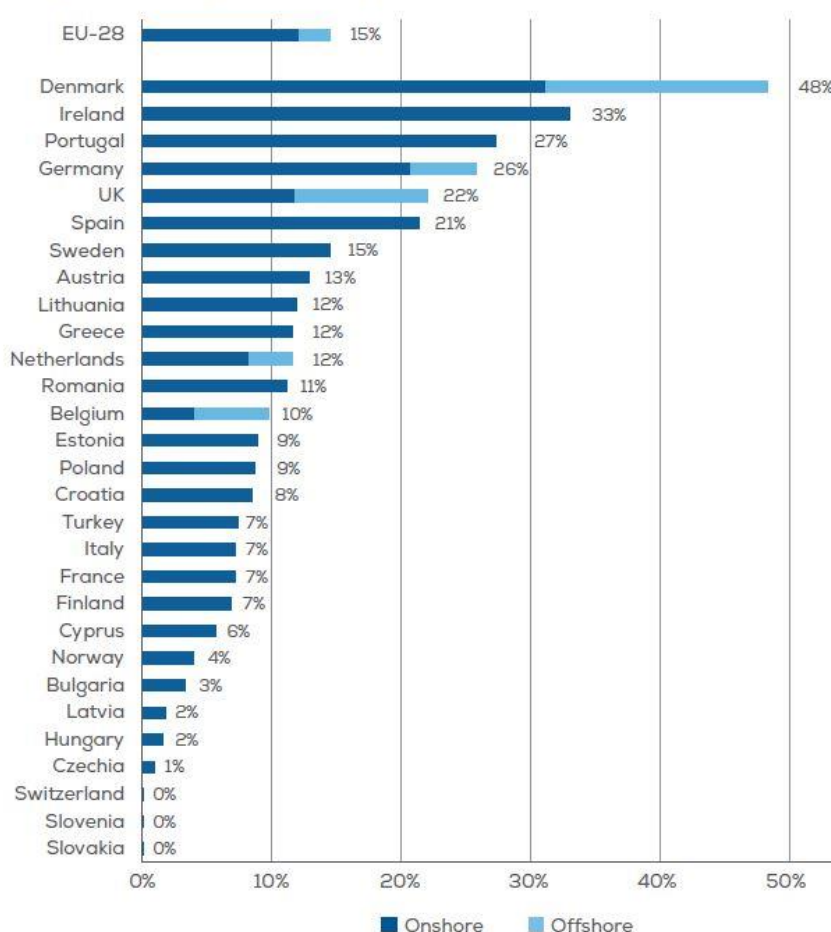
En 2020, 38 % de la production d'électricité en Europe était assurée par les énergies renouvelables.

Quelle dynamique pour l'éolien en Europe ?

En 2020, l'énergie éolienne couvrait à elle seule 16 % de la consommation électrique dans l'Union européenne. Cette part reste très variable entre les pays avec 48 % au Danemark, 38 % en Irlande et 9 % en France. L'éolien se développe rapidement, notamment aux Pays-Bas, en Allemagne et en Norvège, tous les trois sur le podium UE en termes de nouvelle installation. La France, 5^e peut encore faire mieux, d'autant qu'elle dispose du second potentiel éolien en Europe et que la puissance installée y est très faible, comparée à la superficie du pays.

Le taux de couverture de la production électrique par l'éolien est très variable selon les pays européens et il était en moyenne de 16 % en 2020. Le graphique ci-dessous montre que peu de pays européens n'ont aucune éolienne sur leur territoire alors que le Danemark couvre la moitié de ses besoins électriques grâce à l'éolien. Seuls les pays de faible superficie ou avec un gisement de vent limité sont sous la barre des 10 %, ce qui fait de la France une exception.

FIGURE 8
Percentage of the electricity demand covered by wind in 2019¹⁴

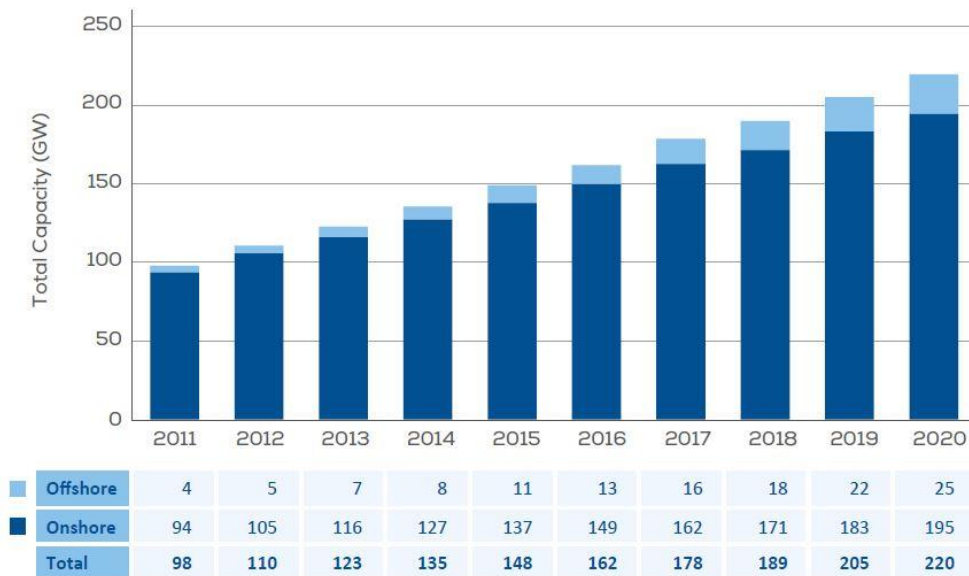


Source : Wind Europe - Wind energy in Europe - p.19 (02/2021)

“Avec 458 TWh de production, l'énergie éolienne couvre 16 % des besoins d'électricité européenne en 2020. » Source : Wind Europe – Wind energy in Europe in 2020 - p.21

La part de la capacité installée de l'éolien augmentent régulièrement en Europe avec l'arrivée de l'éolien en mer (offshore) depuis 2010.

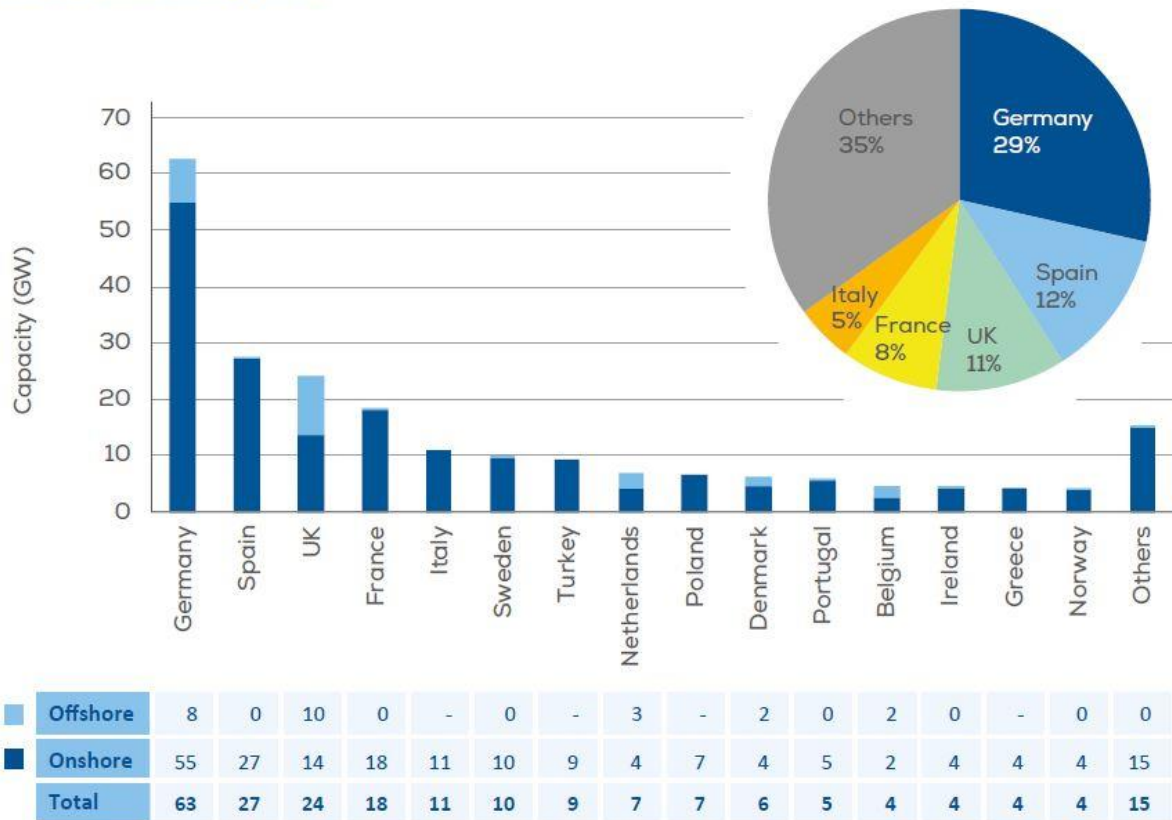
Total wind installations in Europe



Source : Wind Europe - Wind energy in Europe - p.15 (02/2021)

En 2020, le pays avec la puissance éolienne installée (sur terre et en mer) la plus importante est l'Allemagne avec 63 GW. La France est quatrième dans ce classement, avec 18 GW.

Total wind installations by country



Source : Wind Europe - Wind energy in Europe - p.16 (02/2021)

La France dispose du deuxième potentiel éolien d'Europe après le Royaume-Uni. Elle ne comptait pourtant, en 2020, aucune éolienne en mer (hors prototype flottant) malgré son fort potentiel maritime. Le premier parc éolien offshore a été construit à l'été 2022, avant d'être raccordé au réseau la même année. En croisant les données de 14 pays européens, on constate que la France n'est pas un pays dense en éolien en termes de puissance installée ramenée à la superficie ou au nombre d'habitants.

Pays	Habitants (Milliers)	Superficie (km ²)	Eolien (GW)	MW éolien par million d'habitants	MW éolien par km ²
Allemagne	83 042	357 386	61,4	739	0,17
Espagne	46 698	505 992	25,8	552	0,05
Royaume-Uni	66 465	242 545	23,5	354	0,1
France	66 992	551 695	16,6	248	0,03
Italie	60 494	302 072	10,5	174	0,03
Suède	10 196	407 311	9	883	0,02
Pologne	38 386	312 679	5,9	154	0,02
Danemark	5 789	42 925	6,1	1054	0,14
Portugal	10 291	92 226	5,4	525	0,06
Pays-Bas	17 182	41 542	4,6	268	0,11
Irlande	4 857	70 182	4,1	844	0,06
Belgique	11 376	30 688	3,9	343	0,13
Autriche	8 822	83 879	3,2	363	0,04
Roumanie	19 524	238 391	3	154	0,01

Source : Wind Europe – Wind energy in Europe in 2019 (p.10)

Le chiffre clé

16 %

L'énergie éolienne couvrait à elle seule, en 2020, 16 % de la consommation électrique en Europe.

Quelle dynamique pour l'éolien en France ?

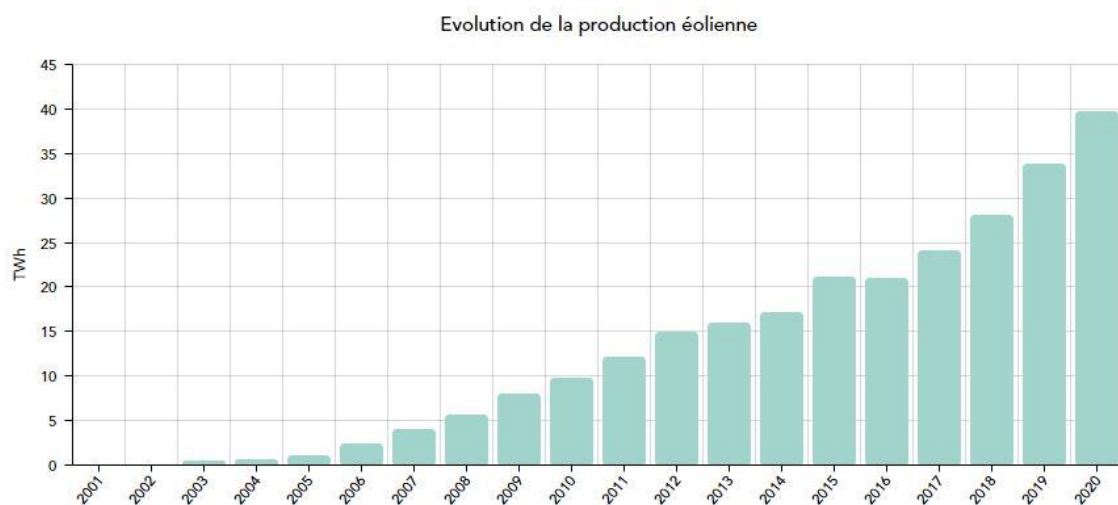
En France, l'énergie éolienne couvrait, en 2020, 8,8 % de la consommation d'électricité du pays. Cette part est en progression constante depuis le début des années 2000 et représente une source incontournable pour continuer à développer les énergies renouvelables sur le territoire. En raison de nombreuses contraintes, la production d'électricité grâce à l'éolien n'est pas homogène sur le territoire : les Hauts-de-France et la région Grand Est sont particulièrement en avance.

L'énergie éolienne représente une part croissante dans le mix énergétique électrique français. L'essor de cette énergie s'est confirmé à partir de 2005, première année où la production est devenue significative (supérieure à un térawattheure, TWh). En 2020, l'éolien représentait 12,9 % de la puissance installée du parc français et couvrait 8,8 % de la consommation électrique nationale. Cette différence s'explique par son facteur de charge plus faible que la moyenne des autres moyens de production électrique. (Voir facteur de charge)

« L'énergie éolienne produite est en hausse, et devient la 3ème source de production devant le gaz » Source : RTE – [Bilan électrique 2020](#)

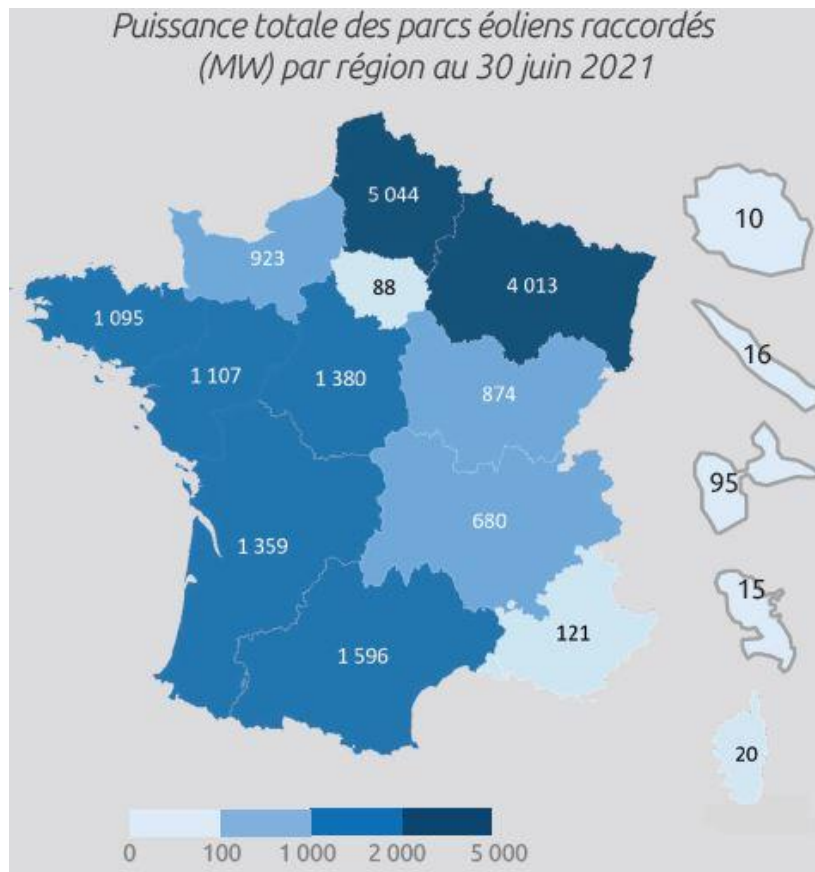
En 2020 la production de l'éolien s'élevait à 40 TWh, en progression constante avec un parc installé de 17 600 MW.

« Mi-2020, les capacités éoliennes sont réparties sur l'ensemble du territoire français, avec plus de 1 450 parcs comptant 8 436 éoliennes.» Source : Capgemini invent pour FEE - [Observatoire de l'éolien 2020 – 09/2020 p.17](#)



Evolution de la production électrique éolienne. Source : RTE – [Bilan électrique 2020](#)

La répartition de l'éolien sur le territoire français n'est pas homogène et dépend principalement de la ressource de vent disponible par région. Certaines contraintes (militaires, techniques ...) qui couvrent des superficies importantes expliquent que de larges zones ne sont pas équipées de parcs éoliens malgré un bon gisement de vent.



Capacité installée Mi-2021 - Source : Capgemini Invent pour FEE - Observatoire de l'éolien 2020 réalisée par - 09/2021 (p.35)

« Si l'hydraulique constitue aujourd'hui la principale source d'énergie renouvelable pour l'électricité en France (environ 12 % de la production totale d'électricité), elle présente peu de possibilités d'accroissement de production. L'énergie éolienne offre, pour le système électrique français, un potentiel technique important et encore largement sous-exploité. » Source : Ademe – Les avis de l'Ademe l'énergie éolienne – 04/2016

L'éolien est la troisième source d'électricité en France, la deuxième pour les énergies renouvelables. Elle devrait dépasser l'hydraulique dans les prochaines années faute d'installation supplémentaire possible pour celle-ci.

Le chiffre clé

9

En France, l'énergie éolienne couvrait, en 2020, 8,8 % de la consommation d'électricité du pays.

L'Allemagne ajoute-t-elle du charbon pour compenser son éolien ?

La France et l'Allemagne sont souvent utilisées pour des comparaisons, qui peuvent s'avérer hasardeuses tant les trajectoires historiques et les ressources disponibles y sont différentes. Avec 10 ans de recul, la décision prise par l'Allemagne de sortir du nucléaire, après la catastrophe de Fukushima en 2011, s'est principalement traduite par un essor des énergies renouvelable.

Le charbon a certes été utilisé dans un premier temps (jusqu'en 2014) mais depuis, ce sont les énergies renouvelables (et le gaz dans une moindre mesure) qui ont remplacé le nucléaire et le charbon. Les comparaisons de la production des différentes filières allemandes, entre 2009 et 2018, sont explicites : le charbon est passé de 254 à 229 TWh ; le nucléaire de 135 à 76 TWh. Dans le même temps, les énergies renouvelables sont passées de 96 à 226 TWh (le gaz a stagné, de 81 à 83 TWh).

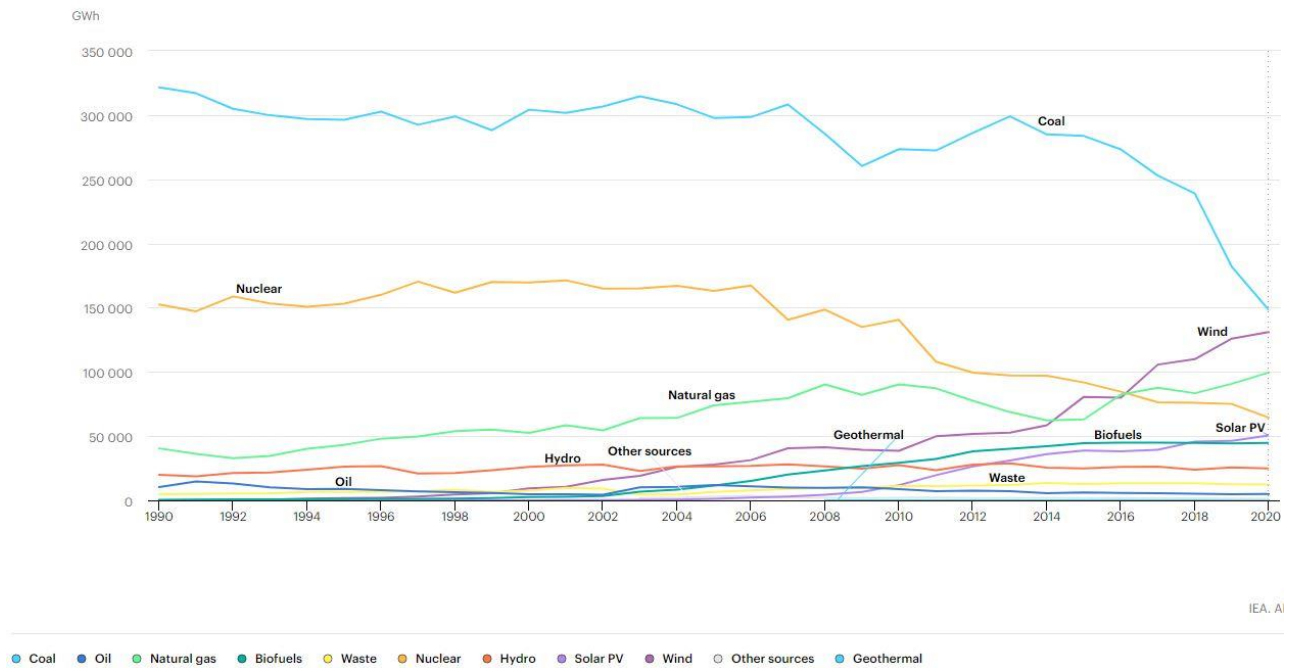
Lors des débats sur l'énergie et sur la production d'électricité en particulier, le cas de l'Allemagne est souvent pris en exemple à suivre ou à éviter. Or les mix énergétiques français et allemand sont difficilement comparables et sortis de leur contexte, les parallèles entre les deux sont parfois incohérents.

Historiquement, la France a très majoritairement misé sur la production électrique d'origine hydraulique puis nucléaire alors que l'Allemagne, surtout à l'est du territoire, a beaucoup de mines de charbon et donc une production électrique importante avec cette source.

Lors de la décision de l'Allemagne de sortir du nucléaire, les autres moyens de production électrique ont dû prendre le relais temporairement en attendant l'essor des renouvelables. En 2013, le prix du charbon était particulièrement bas. C'est donc le charbon, déjà très majoritaire dans le mix électrique, qui a été privilégié au détriment du gaz pour des raisons économiques. Pendant cette période de transition, la puissance installée des centrales charbon a peu variée mais les installations ont été davantage utilisées. C'est le facteur de charge (**Voir facteur de charge**) de cette énergie qui a augmenté temporairement.

A partir de 2014, ce sont bien les énergies renouvelables qui ont compensé la baisse du nucléaire en Allemagne et qui ont également contribué, avec le gaz, à la baisse de la production à base de charbon.

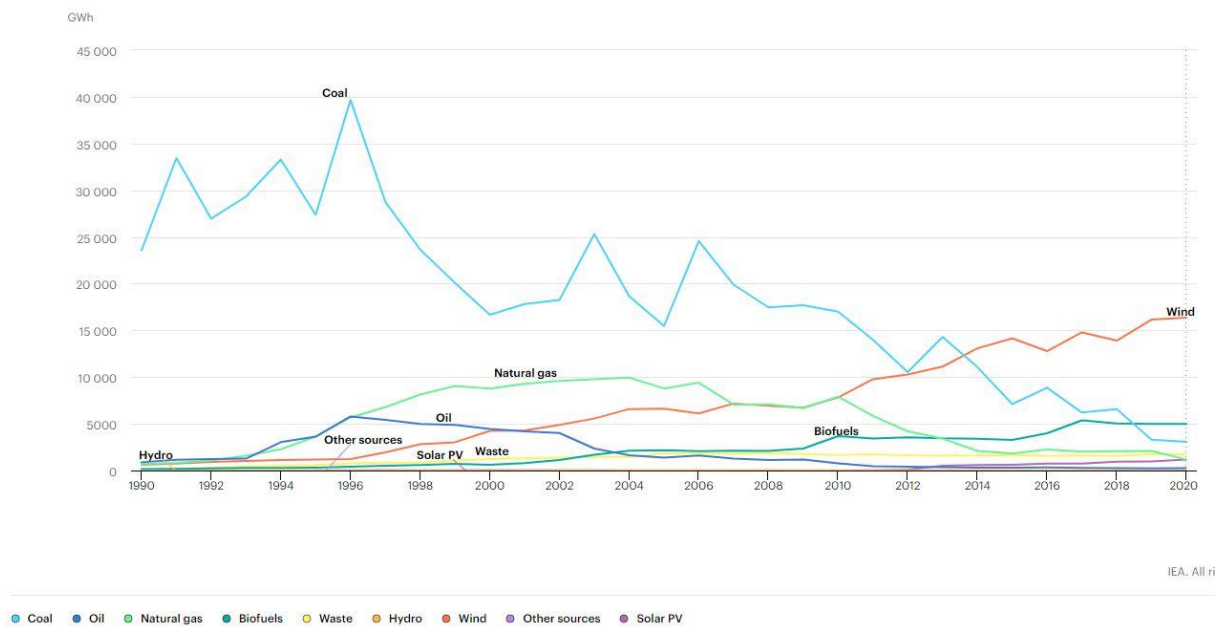
Ces courbes présentent l'évolution de la production d'électricité en Allemagne par secteur sur la période 1990 à 2020 :



Source : IEA (Agence internationale de l'énergie) – [energy statistics data browser](#)

En Allemagne, on remarque que depuis 2007 la production électrique à partir de charbon a été divisée par 2 celle du nucléaire par 2 également tandis que l'éolien a été multiplié par plus de 3 et le photovoltaïque par 16. L'assertion selon laquelle l'éolien en Allemagne nécessite de relancer le charbon s'avère donc fautive et c'est bien le remplacement du charbon et du nucléaire par l'éolien et le photovoltaïque que l'on constate en Allemagne.

Le Danemark, pays européen dont le mix électrique comporte le plus d'éolien, présente un autre exemple. On constate que la production d'électricité ne comporte pas de nucléaire et que le charbon est en baisse constante ainsi que le gaz alors que l'éolien représente plus de 50 % de la production d'électricité.



Source : IEA (Agence internationale de l'énergie) – [energy statistics data browser](#)

Le chiffre clé

2

En Allemagne, la production électrique à base de charbon et de nucléaire a été divisé par 2 en 15 ans et l'éolien a été multiplié par 3 et par 16 pour le photovoltaïque.

Quelle est la dynamique de l'éolien en Nouvelle-Aquitaine ?

La Nouvelle-Aquitaine est la plus grande région de France. Pour autant, elle n'est que la 4^e en termes de puissance éolienne raccordée au réseau, malgré un gisement de vent intéressant. Ces chiffres la placent en retard par rapport aux autres régions, mais aussi par rapport aux objectifs fixés par le Conseil régional (dans un document nommé Sraddet). La Nouvelle-Aquitaine étant très grande, on comprend facilement que les conditions varient largement rendant favorable ou non le développement des énergies renouvelables selon leur type. Le relief, les zones naturelles à protéger, les villes, les zones militaires ou les gisements de vents sont autant de variables qui expliquent qu'actuellement, le nord de la région (les Deux-Sèvres et la Vienne notamment) est plus favorable au développement de l'éolien. De la même manière que la Corrèze (avec ses cours d'eau) ou les Landes (grâce à l'ensoleillement) sont plus propices à la production hydraulique ou photovoltaïque.

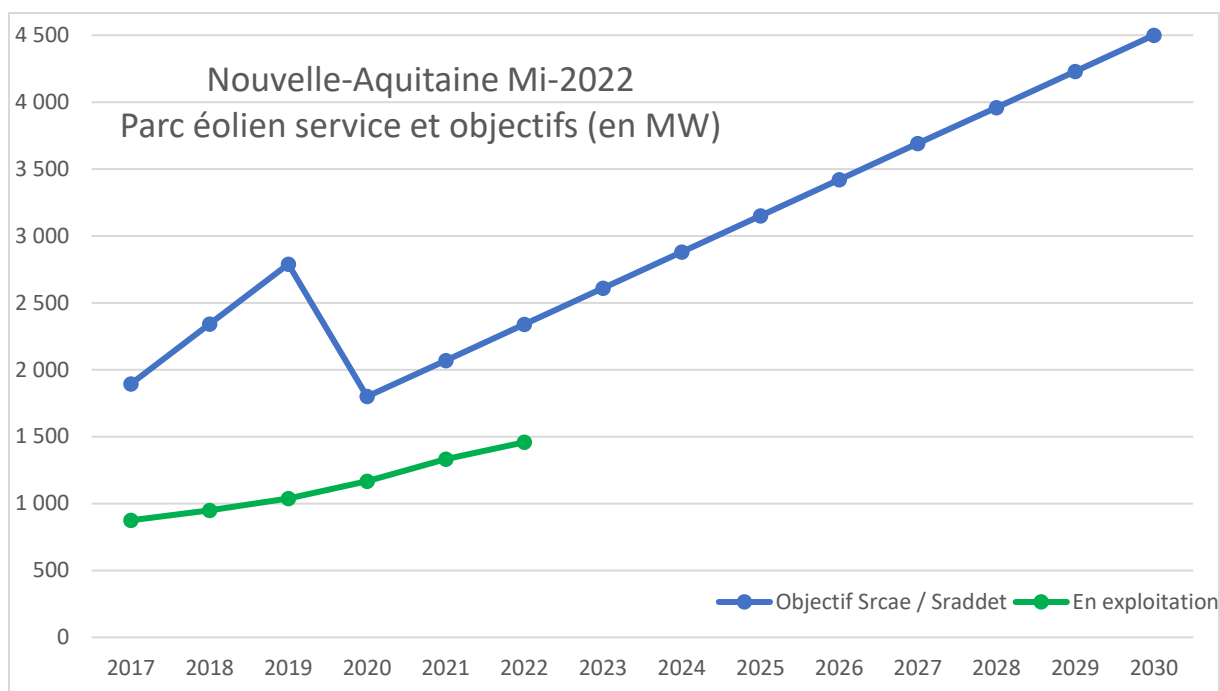
Etat des lieux en Région et objectifs

La Nouvelle-Aquitaine est la plus grande région de France par sa superficie, elle a donc un rôle primordial à jouer dans le déploiement des énergies renouvelables. Par ailleurs, sa densité de population est plutôt faible. Le territoire présente donc de nombreux atouts pour l'éolien mais également pour le photovoltaïque et l'hydraulique. Toutefois, les ressources ne sont pas réparties de façon homogène entre les départements.

Au total, mi-2022, la Nouvelle-Aquitaine comptait 1 441 MW d'éolien en exploitation, pour 659 éoliennes, soit 7,2 % de la puissance nationale pour un territoire couvrant 15,4 % de la France métropolitaine.

Source : Ministère de la transition énergétique – [statinfo](#) – [tableau de bord éolien 2^e trimestre 2022](#)

Les Schéma Régionaux de l'Eolien (SRE) sont des documents caducs mais ils peuvent être utilisés pour comparer les ambitions des anciennes régions à l'échéance 2020 avec les chiffres actuels. On constate que l'objectif agrégé des 3 ex-régions pour 2019, n'est rempli qu'à hauteur de 51 % (1 441 MW sur un cumul de 2 790 MW). La Nouvelle-Aquitaine accuse donc un retard considérable sur ses propres objectifs.



A présent, c'est le Sraddet (Schéma régional d'aménagement, de développement durable et d'égalité des territoires), validé le 27 mars 2020 par la Région, qui fixe les objectifs pour l'éolien. Il est prévu 4 500 MW d'éolien terrestre pour 2030 et 7 600 MW pour 2050. Cela correspond donc à un rythme d'installation moyen entre 2020 et 2030 de 335 MW par an, soit une petite centaine d'éoliennes.

Source des chiffres : Région Nouvelle-Aquitaine - Rapport d'objectifs du SRADDET – 12/2019 (p.150)

La Nouvelle-Aquitaine est donc historiquement en retard sur le développement de l'éolien, comparé à d'autres régions et en considérant son potentiel confirmé par les objectifs du Sraddet. En tenant compte de l'augmentation de puissance des éoliennes actuelles et du repowering (remplacer tout ou partie d'anciennes infrastructures énergétiques par de nouvelles), il faudrait ajouter 3 GW, soit environ 750 éoliennes pour atteindre cet objectif (soit une multiplication par plus de 2 du nombre de mâts).

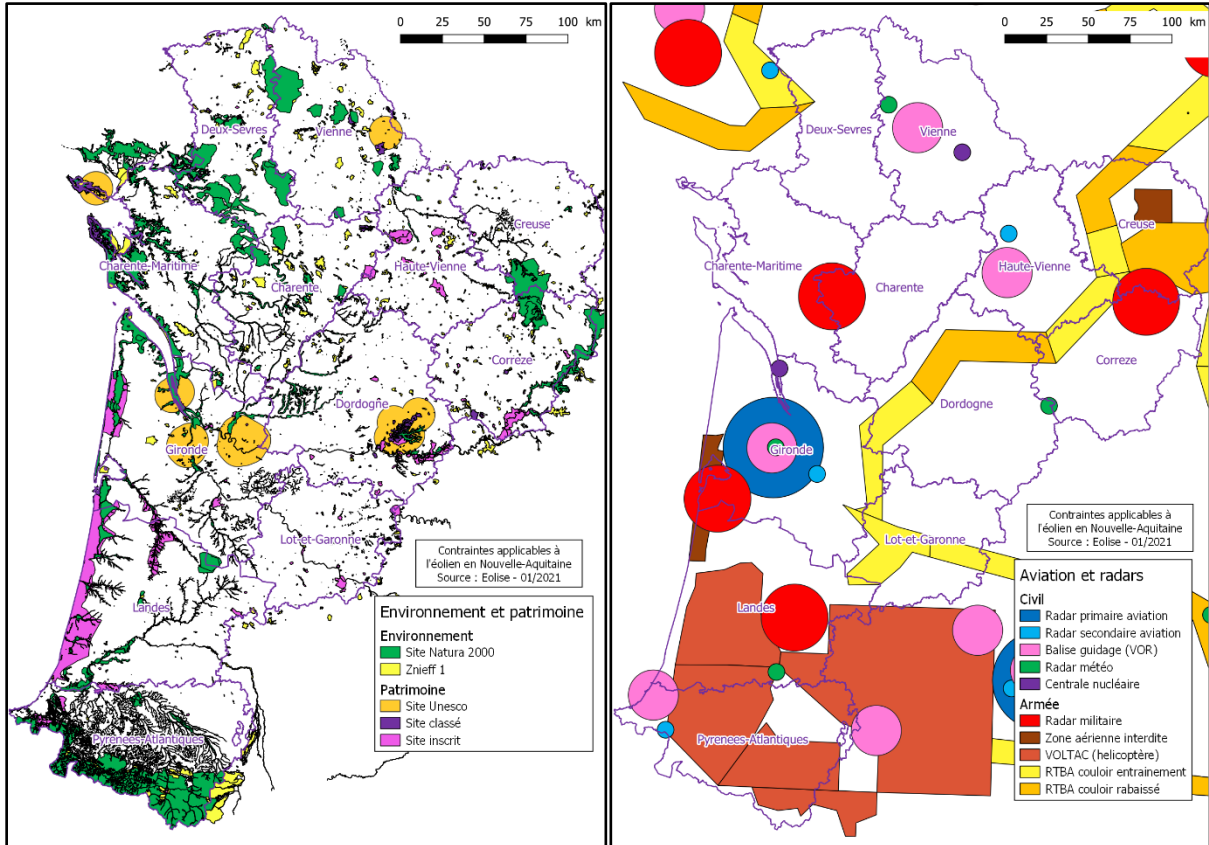
Contraintes techniques et gisement éolien

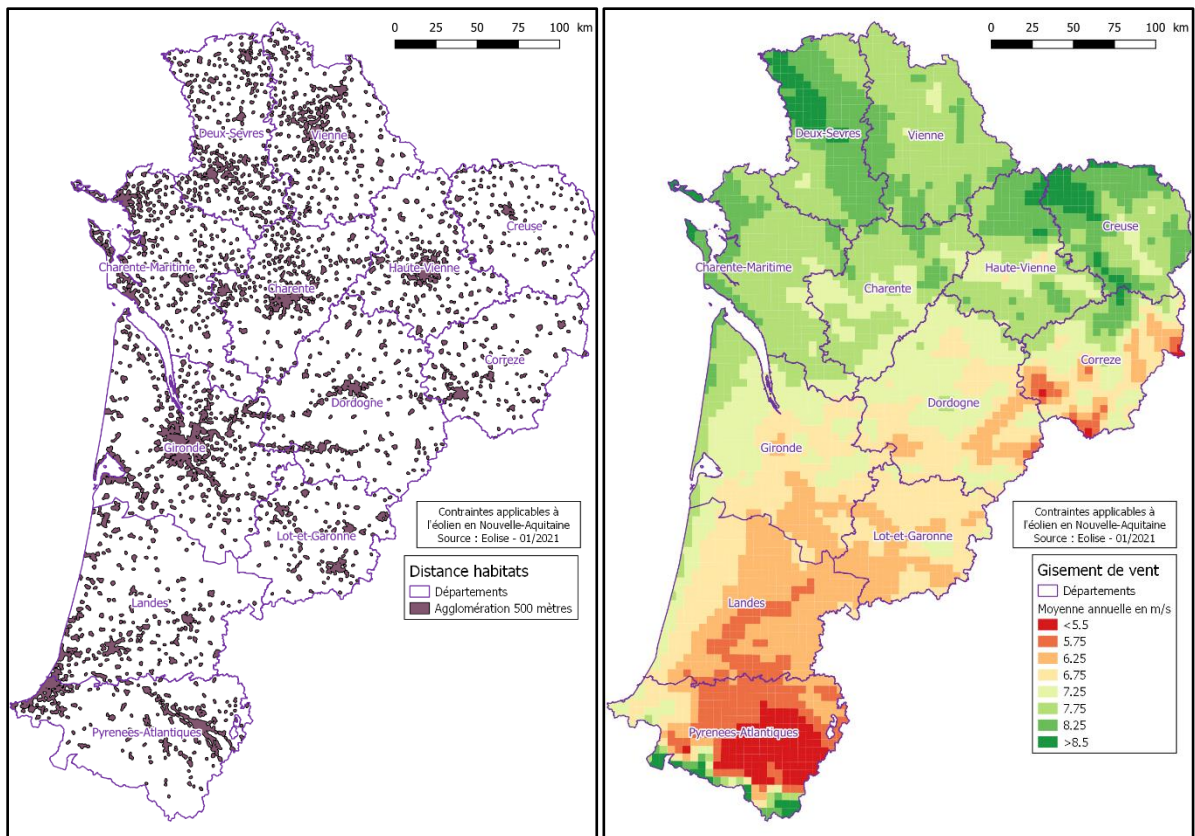
La répartition inéquitable de l'éolien sur le territoire s'explique par les contraintes techniques et le gisement de vent régional hétérogène. C'est une question éminemment technique et non politique, comme on peut souvent l'entendre. Le Sraddet prévoit le développement éolien en suivant une meilleure répartition entre les départements mais qui sera limité par le pragmatisme de ces enjeux.

Pour comprendre la répartition des éoliennes sur le territoire, on peut étudier les différentes contraintes par catégorie puis les superposer. Ci-dessous, une série de cartes propose une approche volontairement simplifiée pour illustrer les contraintes larges qu'il convient d'éviter.

1. Environnement : Les zones protégées pour des raisons écologiques comme les sites Natura 2000 ou les Znieff 1. Sites et patrimoine : Les sites inscrits et classés ainsi que les sites Unesco et leur périphérie.
2. Contraintes techniques type radars de l'aviation civils et militaires ou météorologique. Zones de protection aéronautique civils puis zones et couloirs d'entraînement militaires.

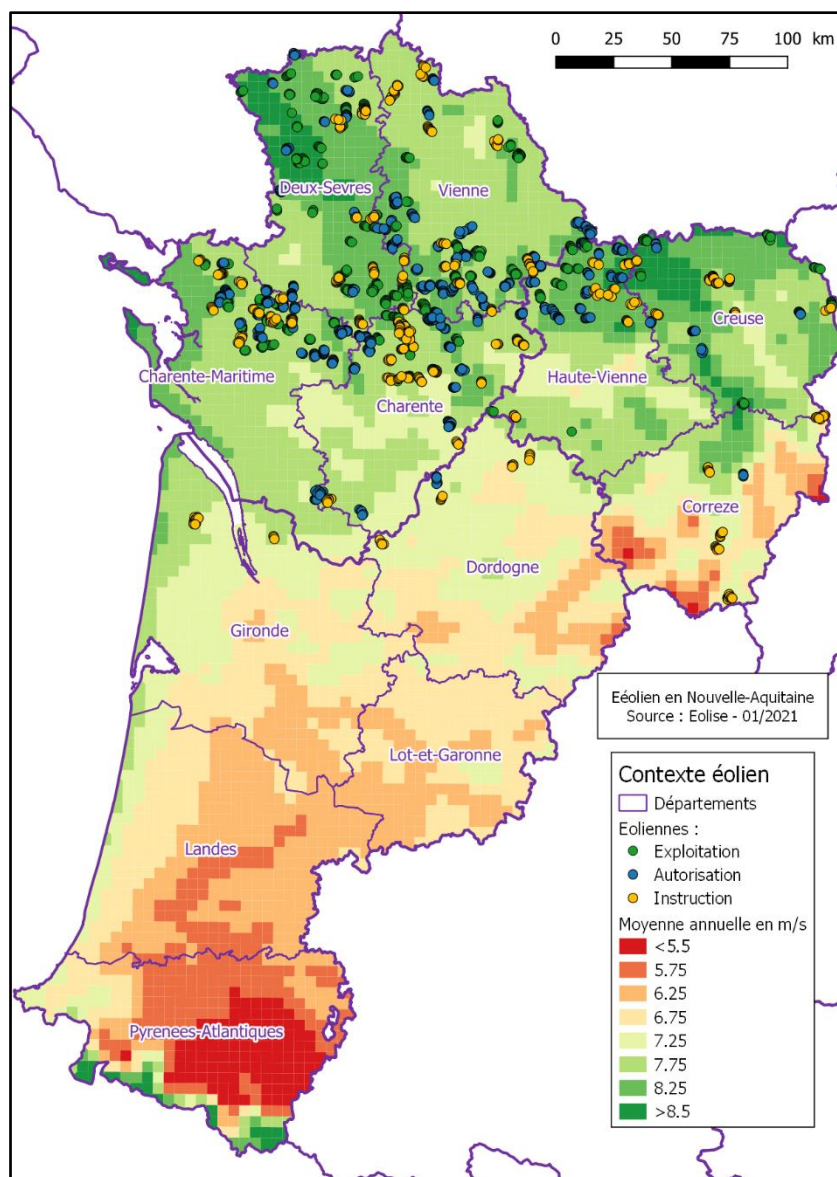
3. Grandes zones urbanisées qu'il faut compléter par l'ensemble des habitations diffuses sur le territoire.
4. La moyenne annuelle de vitesse du vent à 100 m de hauteur. Un gisement de vent annuel à 8,5 m/s (vert foncé) produit deux fois plus d'énergie qu'un gisement à 6,75 m/s (jaune orangé). Pour rappel l'énergie du vent est fonction du cube de sa vitesse (**Voir taille et puissance**). Le développement se fait donc en priorité dans les zones avec un meilleur potentiel énergétique.





Répartition de l'éolien et des énergies renouvelables par département

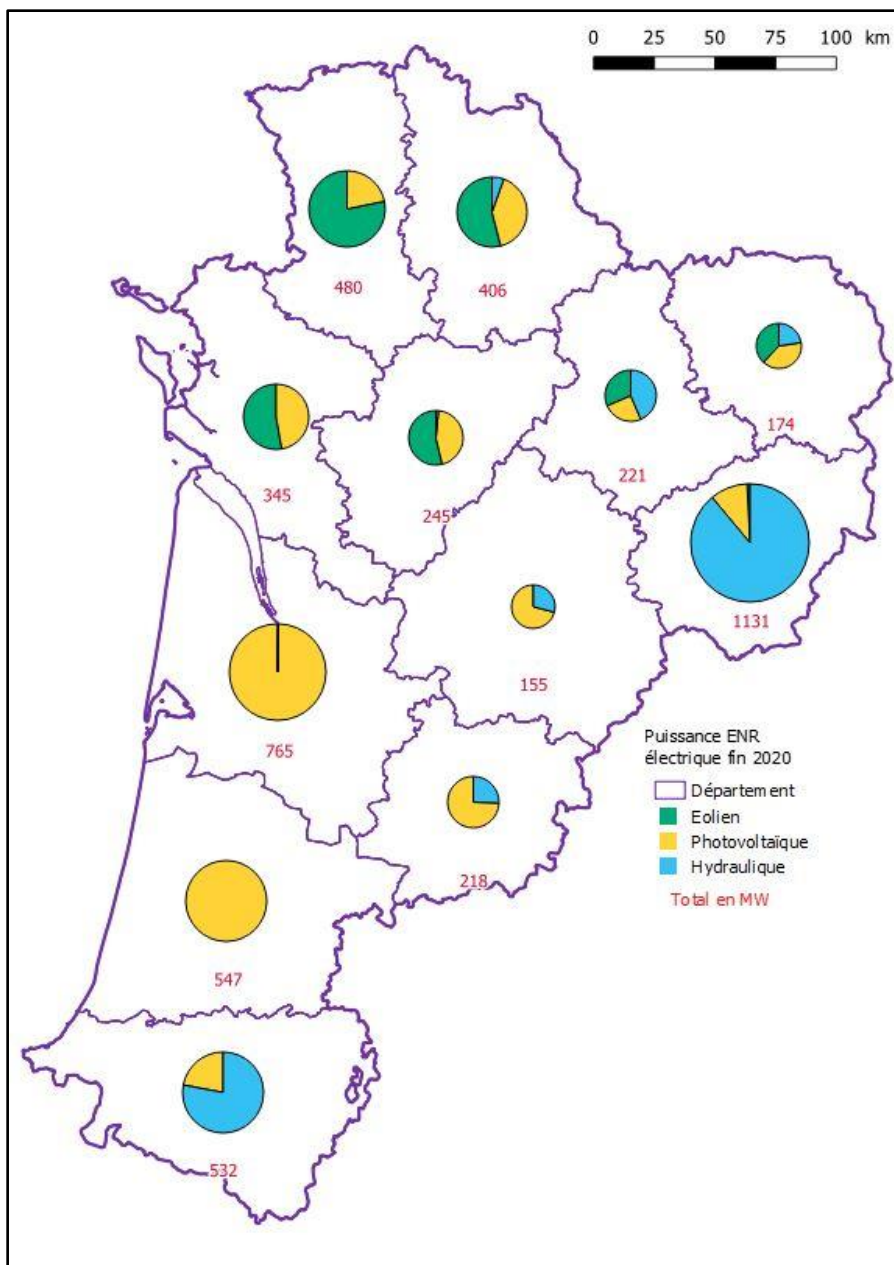
La superposition des contraintes rédhibitoires et du gisement de vent explique facilement la carte de répartition de éoliennes sur le territoire.



L'objectif ambitieux du Srdet pose la question de la répartition des installations sur le territoire. Les chiffres par ex-région révèlent que 87 % de la puissance éolienne est installée en Poitou-Charentes pour 13 % en Limousin et rien en Aquitaine.

Considérant les contraintes applicables à l'éolien et le gisement de vent, le développement continuera d'être favorisé dans certains départements. D'autres départements pourraient prendre le relais dans une moindre mesure, grâce à l'amélioration de la technologie des éoliennes capables de capter des vents plus faibles. Toutefois, pour libérer le potentiel du territoire en Nouvelle-Aquitaine, il faudrait que certaines contraintes, en particulier militaires, soient levées.

L'éolien n'est pas une exception et on constate également un déséquilibre important entre départements pour le photovoltaïque et l'hydraulique. Cette carte représente la répartition de chacune de ces 3 énergies renouvelables électriques. Les 4 départements avec les puissances installées les plus importantes sont la Corrèze, la Gironde, les Landes et les Pyrénées-Atlantiques.



Chaque département profite donc de son potentiel énergétique en déployant la ou les énergies renouvelables adaptées. En Limousin et Pyrénées-Atlantiques, c'est l'hydraulique qui domine. En Aquitaine, c'est principalement le photovoltaïque complété par de l'hydraulique vers les Pyrénées. En Poitou-Charentes l'éolien domine, complété par du photovoltaïque.

Il est donc illusoire d'attendre une répartition homogène de l'éolien sur le territoire néo-aquitain tout comme il n'est pas imaginé que l'hydraulique soit réparti équitablement entre département.

Le chiffre clé

4

La Nouvelle-Aquitaine est la plus grande région de France. Pour autant, elle n'est que la 4^e en termes de puissance éolienne raccordée au réseau

Technique de l'éolien



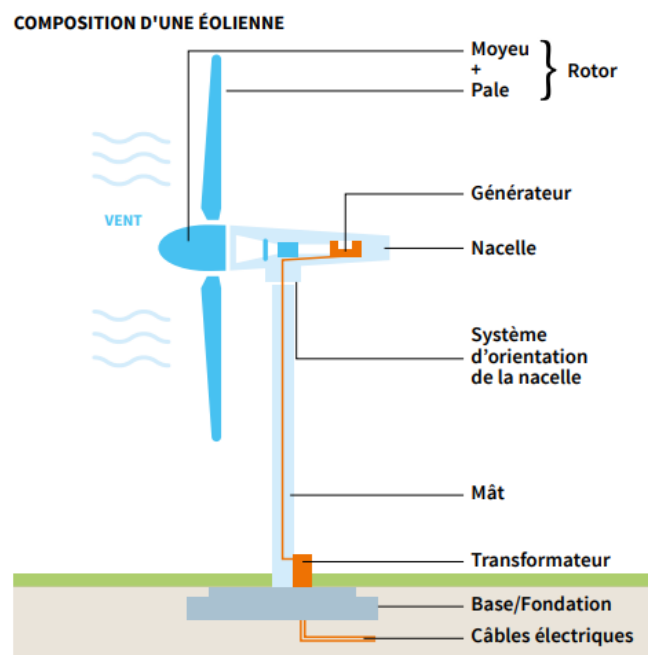
Comment fonctionne une éolienne ?

Comprendre le fonctionnement d'une éolienne implique d'en comprendre la composition. Pales, mât, nacelle, fondations... tous ces éléments constitutifs d'une éolienne sont décrits ici. Bien sûr, les modèles varient en fonction des avancées technologiques et des spécificités locales. Un exemple, sélectionné ci-dessous, permet d'illustrer la taille et le poids de chacun des éléments.

L'éolienne sert à convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. Pour cela, elle est composée de plusieurs éléments principaux que l'on retrouve sur le schéma suivant.

Le **rotor** est la partie qui entre en rotation grâce à l'énergie cinétique du vent. Le rotor est composé de 3 **pales** et du **moyeu** qui est la pièce centrale reliant les pales à l'**axe de rotation**. L'axe est composé du moyeu et d'une génératrice ainsi que d'un multiplicateur de vitesse, sauf pour les technologies à entraînement direct. La **génératrice** transforme l'énergie de rotation de l'axe en énergie électrique. La **nacelle** est située en haut du mât et elle comprend la génératrice, le multiplicateur de vitesse et les éléments électriques.

Le **mât** est généralement composé de 3 à 5 sections en acier et il supporte la nacelle et le rotor. Certains mâts sont en béton précontraint, ou un mixte béton et acier, ils se distinguent par une base plus évasée. Le mât est fixé aux **fondations**, enterrées dans le sol, qui soutiennent l'ensemble de la structure. A la base du mât sont situées les armoires de commande et le transformateur électrique dans la plupart des cas.



Source : [site Mtaterre – fonctionnement de l'énergie éolienne](#)

Les **fondations enterrées** sont composées de béton armé et sont dimensionnées selon le poids de l'éolienne, les contraintes et le type de sol caractérisé grâce à une étude géotechnique. Elles sont

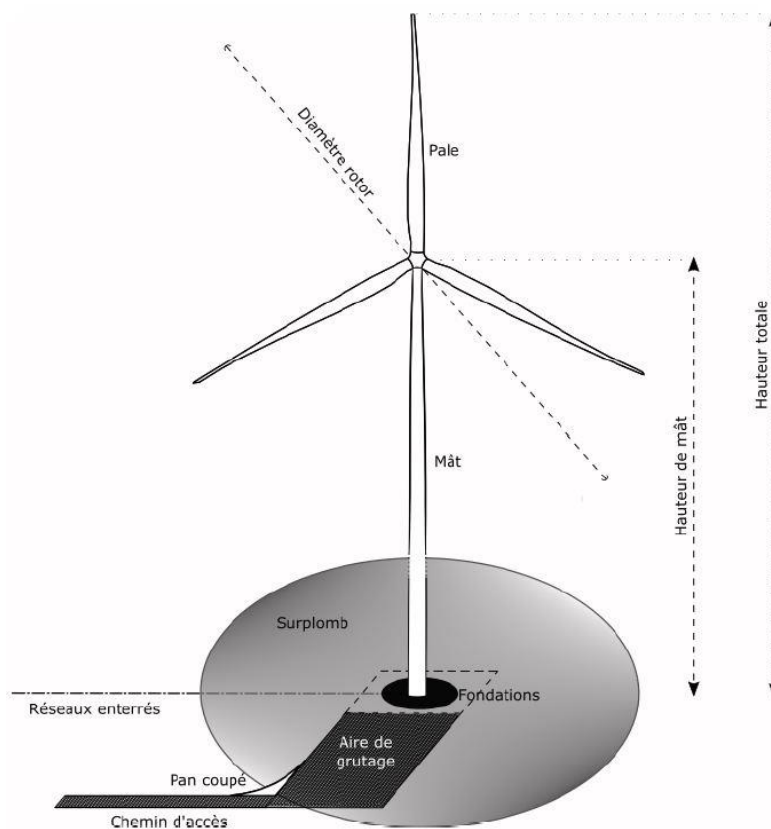
généralement circulaires, parfois octogonales. Leur diamètre varie de 15 à 30 mètres et leur profondeur d'environ 2,5 à 3,5 mètres. Le volume de béton nécessaire aux fondations correspond à celui nécessaire pour la construction de 3 à 6 habitations individuelles.

Une **plate-forme parfois accompagnée d'un chemin d'accès** sont nécessaires pour accéder à l'éolienne et monter une grue pendant la phase de construction, d'exploitation et de démantèlement.

La rotation se fait dans le sens horaire quand on regarde l'éolienne en face. La **hauteur de l'axe de rotation** du rotor correspond à la hauteur du mât plus la hauteur de la génératrice dans la nacelle. Par raccourci on parle de la **hauteur du mât** pour désigner la hauteur de l'axe de rotation. La hauteur totale correspond à la **hauteur maximum** pour une pale levée à la verticale (soit hauteur du mât + longueur d'une pale).

Le **surplomb** correspond à la zone surplombée par les pales de l'éolienne. Les **réseaux enterrés** permettent de connecter les éoliennes entre elles et au réseau électrique de distribution. Tous les réseaux électriques nécessaires au parc éolien sont enterrés, comme le prévoit la réglementation française.

La durée de vie des éoliennes dépend des modèles, de la qualité de la maintenance et du niveau de fatigue induit par les conditions du site d'implantation. Les éoliennes ont une **durée de vie** de 20 à 30 ans, bien qu'elles puissent être remplacées avant leur fin de vie par un modèle plus récent, c'est ce qu'on appelle le repowering.



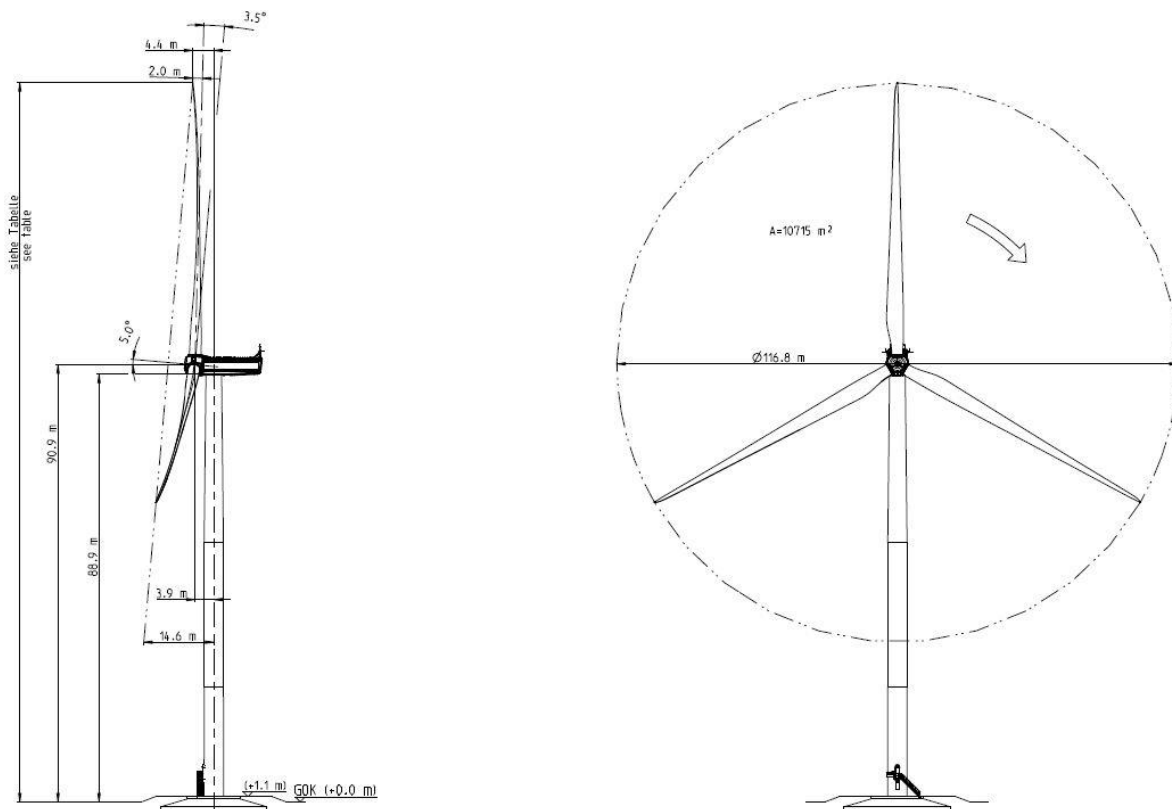
Source : Eolise - schéma descriptif d'une éolienne

Les dimensions et le poids des éléments d'une éolienne varient considérablement selon le modèle (Voir Taille et puissance des éoliennes). Mi-2021, l'éolienne la plus installée en France est le modèle E-82 du constructeur Enercon (ce modèle représente 1 700 MW, soit 8,5 % de la puissance nationale et environ 740 machines). En 2019, le modèle le plus installé en France était la Nordex N117. Le tableau suivant présente les dimensions principales et le poids des éléments de la Nordex N117.

Nordex N117 puissance 3 MW mâât acier 91 m hauteur totale 150 mètres

Eléments	Dimensions (mètres)	Poids (tonnes)
Pale	Longueur 57,3 m	12
Rotor (moyeu et 3 pales)	Diamètre 117 m	74
Nacelle et génératrice	13 m (de long) 4x4 m	127
Ensemble rotor et nacelle		201 t
Mât acier 3 sections	91 m diamètre base 4 m	191
Transformateur et commande	A la base du mâât	12
Total éolienne hors fondation		404 t
Fondation béton (516 m ³)	Diamètre 19 m, hauteur 3m	1290
Cage métallique et ancrage		62
Total éolienne + fondation		1 756 t
Plateforme	40x25 m	

Source : Constructeur Nordex - fiche technique N117 puissance 3 MW mâât acier 91 mètres



La puissance de l'éolienne est exprimée en mégawatt (MW) soit 1 000 kilowatts (kW) ou 1 000 000 de watts.

Le chiffre clé

25

En moyenne, une éolienne a une durée de vie comprise entre 20 et 30 ans.

Quel est le rapport entre la taille et la puissance d'une éolienne ?

La hauteur et le diamètre des éoliennes sont très importants et vont déterminer leur capacité à produire de l'électricité. En effet, plus l'altitude augmente, plus le vent est puissant et stable. De même, un diamètre plus important, grâce à des pales plus longues, permettra de capter plus de vent, et de produire davantage d'électricité. Le dernier élément qui va déterminer la production électrique d'une éolienne est sa puissance nominale. Les dernières générations d'éoliennes ont une puissance nominale bien plus importantes, par rapport à celles d'il y a 15 ans. En fonction de ces variables, la production estimée d'une éolienne de nouvelle génération sera 3,5 fois plus élevée que celle d'une ancienne génération.

L'énergie produite par une éolienne dépend de la ressource de vent et donc du site d'implantation. Pour un site équivalent, ce sont surtout les dimensions de l'éolienne qui importent, puis sa technologie. (Voir courbe de puissance d'une éolienne ci-dessous). Les éoliennes récentes ont des dimensions plus importantes que les anciennes générations ce qui permet une production accrue. Les 3 caractéristiques principales sont le diamètre du rotor, la hauteur d'axe et la puissance nominale. (Voir description d'une éolienne ci-dessous).

Diamètre du rotor

La longueur de la pale détermine le rayon du rotor, le diamètre est donc le double de la longueur de la pale. La superficie balayée par le rotor varie selon la longueur du rayon au carré selon la formule : $Surface\ cercle = \pi r^2$.

Une éolienne de 50 mètres de diamètre (pales de 25 mètres) balaye une superficie de 1 963 m². Alors qu'avec un diamètre doublé, 100 mètres, la superficie balayée est 4 fois plus importante. Avec un diamètre triplé, 150 mètres, la superficie est 9 fois plus importante. Le diamètre du rotor est donc primordial car la surface balayée par le rotor est proportionnelle à l'énergie récupérable.

Diamètre (mètres)	Superficie (m ²)	Ratio
50	1 963	1
100	7 854	4
150	17 671	9

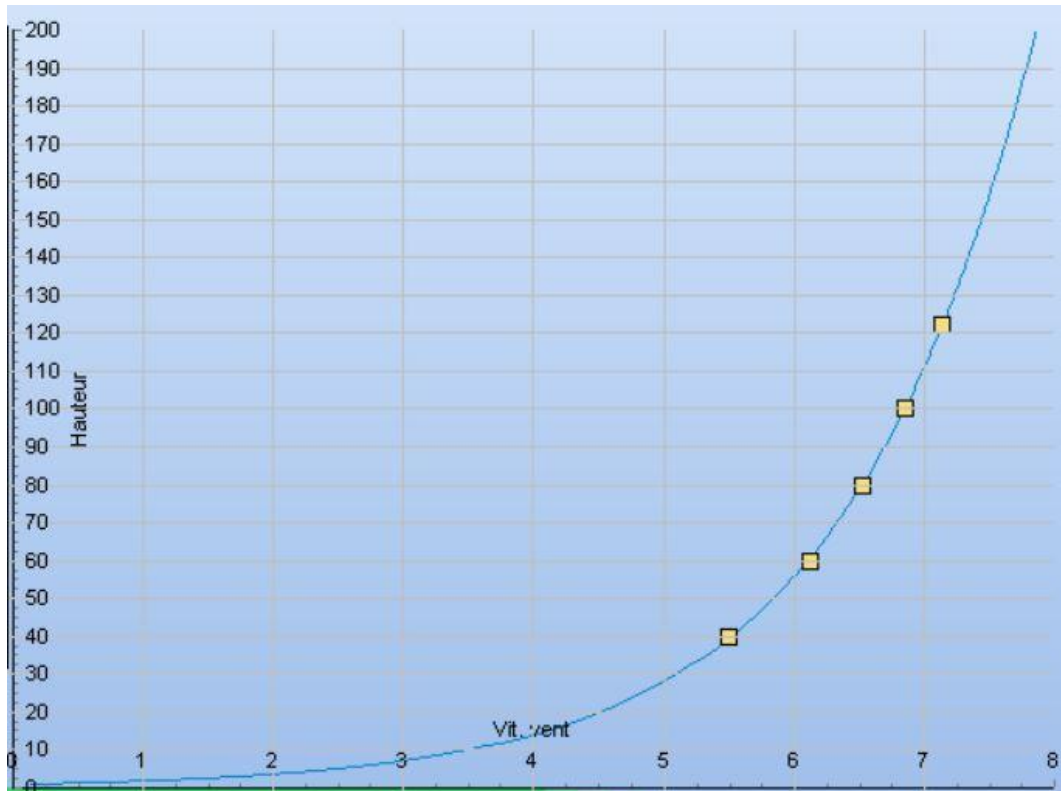
Hauteur d'axe

La hauteur d'axe (hauteur du mât) est déterminante, car la vitesse du vent augmente avec l'altitude. L'énergie cinétique (Ec) du vent varie en fonction de sa vitesse au cube selon la formule : $Ec = \frac{1}{2} * \rho * S * V^3$. Avec ρ la masse volumique de l'air (en kg/m³), S la surface balayée en m² et V³ la vitesse du vent au cube. Le résultat en Watt est l'énergie du vent qui ne peut être entièrement récupérée car cela reviendrait à « stopper » complètement le vent. L'énergie théoriquement récupérable ne peut franchir la « limite de Betz » soit 16/27 de l'énergie qui traverse la surface couverte par le rotor.

La formule mathématique ci-dessus implique qu'une dizaine de mètre de hauteur de mât en plus peut faire une différence conséquente : un petit peu de vent en plus, c'est beaucoup plus d'énergie produite.

Avec une vitesse de vent 2 fois plus rapide la production est 8 fois plus importante.

La courbe de cisaillement ci-dessous représente le profil de la vitesse du vent selon la hauteur. Cette courbe suit une fonction logarithmique. Cela signifie que plus on monte en altitude, plus le vent souffle fort.



Source : Logiciel Windpro - données réelles d'un mât de mesure de vent pour un site plat

Selon cette courbe de cisaillement, on peut comparer plusieurs hauteurs et l'évolution de la vitesse du vent pour en déduire son énergie. A 90 mètres de haut, le vent contient 8 % plus d'énergie qu'à 80 mètres. A 120 mètres le vent contient 30 % d'énergie en plus qu'à 80 mètres.

Hauteur (Mètres)	Vitesse du vent (Mètres / seconde)	Energie du vent (Watts)	Ratio
80	6,51	168 985	1
90	6,68	182 573	1,08
100	6,84	196 008	1,16
110	6,97	207 398	1,23
120	7,10	219 220	1,30

Le vent est également plus laminaire et plus stable en hauteur, ce qui sollicite moins le mécanisme des éoliennes et rallonge leur durée de vie.

Puissance nominale

La puissance nominale de l'éolienne est la puissance électrique maximum que la génératrice peut produire. Cette puissance est atteinte quand le vent atteint la vitesse nominale de l'éolienne. (Voir [courbe de puissance d'une éolienne](#)).

La puissance nominale, couramment exprimée en mégawatt (MW), est souvent appelée puissance par simplification (pour rappel : 1 MW = 1 000 kW = 1 000 000 Watts). Elle doit être adaptée au potentiel de vent du site, au diamètre du rotor et à la hauteur d'axe. Certains modèles d'éoliennes disposent d'une gamme avec plusieurs puissances nominales disponibles, indépendamment des dimensions.

Comparaison de plusieurs modèles

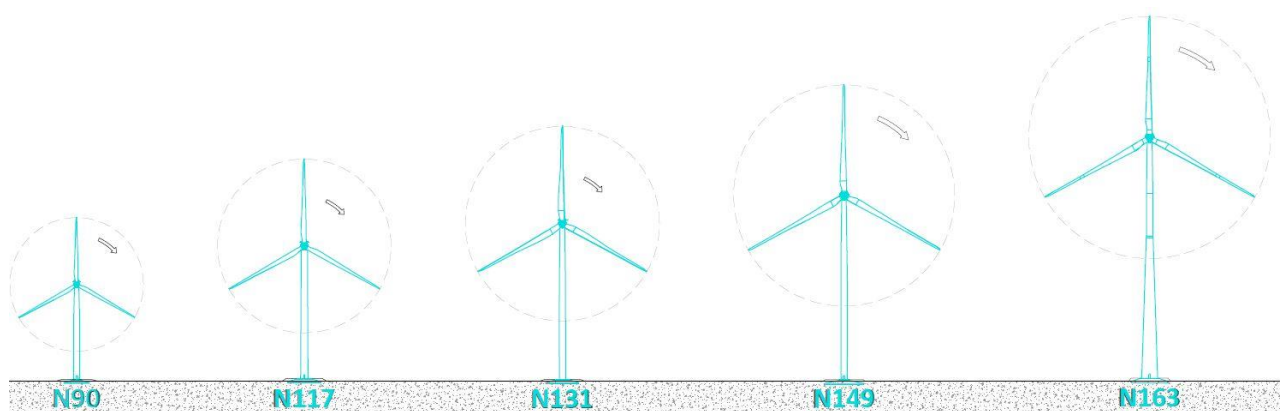
Ci-dessous, un exemple permet de comparer 5 éoliennes de la gamme Nordex. Sur les modèles présentés, la N90 est la plus ancienne génération, mise en service à partir de 2005. La N117 et la N131 sont d'une génération actuelle avec des mises en service depuis 2013 / 2014. La N149 est une éolienne plus moderne avec des premières installations en 2022 et la N163 pourrait arriver en 2025.

Modèle	Année 1 ^{ère} installation	Diamètre mètres	Puissance MW	Superficie balayée m ²	Hauteur		Vitesse de vent m/s	Comparatif		
					mât mètres	totale mètres		Production MWh	Superficie balayée	Production
N 90	2005	90	2,3	6 362	65	110	6,3	5 100	100%	52%
N 117	2013	117	3	10 751	91	149,5	6,8	9 900	170%	194%
N 131	2014	131	3,6	13 478	106	171,5	7,1	13 900	210%	273%
N 149	2022	149	5,7	17 437	125	199,5	7,2	19 600	270%	384%
N 163	2025	163	6,8	20 867	164	245,5	7,4	26 200	330%	514%

Source : Constructeur Nordex données technique– Estimation du productible avec logiciel Windpro

En croisant l'augmentation de la superficie balayée, de la puissance et de la hauteur, on constate que la production estimée d'une éolienne de nouvelle génération est 3,5 fois plus élevée que celle d'une ancienne génération. En 15 ans, les évolutions technologiques et les dimensions des éoliennes permettent de produire 3 à 4 fois plus d'électricité par machine installée.

Le schéma suivant permet de représenter la différence de dimensions de ces 4 modèles.



Source : Constructeur Nordex profil de 5 modèles à l'échelle

« L'évolution de l'éolien terrestre doit permettre d'équiper des sites aux conditions de vent plus diversifiées, mais à facteur de charge équivalent ou supérieur aux parcs éoliens actuels. Cette évolution est réalisée en installant des éoliennes avec des mâts plus hauts et des rotors avec une surface de balayage supérieure. » Source : Cycleco pour Ademe – Impacts environnementaux de l'éolien français – Données 2015

Le chiffre clé

4

Une éolienne moderne de plus grande dimension produit 4 fois plus d'énergie qu'une éolienne de génération plus ancienne.

Qu'est-ce que la courbe de puissance d'une éolienne ?

La production d'une éolienne dépend évidemment du vent, qui souffle plus fort au niveau de sa nacelle qu'au niveau du sol. Les éoliennes commencent à produire de l'électricité lorsque le vent à la nacelle dépasse 3 mètres par seconde (m/s), soit 11 km/h. La production d'électricité augmente très vite par rapport à la vitesse du vent. En fonction des modèles d'éolienne, la puissance nominale est atteinte pour un vent entre 36 et 47 km/h. A partir de cette vitesse et au-delà, l'éolienne produit à sa puissance maximum. En cas de tempête, le vent souffle trop fort et dépasse la « vitesse d'arrêt ». Dans cette configuration très rare, au cours de laquelle l'éolienne ne produit pas d'électricité, l'éolienne peut résister à des vents allant jusqu'à des tornades.

Quand le vent est trop faible le rotor ne reçoit pas assez d'énergie cinétique et l'éolienne ne tourne pas. En l'absence de vent ou pour un vent très faible la production électrique est donc nulle. Les éoliennes commencent à produire au-dessus de leur **vitesse de démarrage**, généralement à 3 m/s (mètres par seconde) de vent, soit 11 km/h, l'équivalent d'une petite brise sur l'échelle de Beaufort.

Echelle de Beaufort

Force	Définition	Vitesse du vent		Description
		Km/h	M/s	
0	Calme	<1	0	La fumée monte verticalement
1	Très légère brise	1 à 5	0,3 à 1	La fumée indique la direction du vent, les girouettes ne s'orientent pas
2	Légère brise	6 à 11	2 à 3	On sent le vent sur le visage, les feuilles bougent
3	Petite brise	12 à 19	3 à 5	Les drapeaux flottent bien, les feuilles sont sans cesse en mouvement
4	Jolie brise	20 à 28	6 à 8	Les poussières s'envolent, les petites branches plient
5	Bonne brise	29 à 38	8 à 11	Les petits arbres balances, les sommets de tous les arbres sont agités
6	Vent frais	39 à 49	11 à 14	On entend siffler le vent
7	Grand frais	50 à 61	14 à 17	Tous les arbres s'agitent
8	Coup de vent	62 à 74	17 à 21	Quelques branches cassent
9	Fort coup de vent	75 à 88	21 à 24	Le vent peut endommager les bâtiments
10	Tempête	89 à 102	25 à 28	Visibilité réduite, gros dégâts
11	Violente tempête	103 à 117	29 à 33	Conditions exceptionnelles, visibilité réduite, gros dégâts
12	Ouragan	> 118	> 33	Dommages maximum

La vitesse de vent qu'il faut prendre en compte pour les éoliennes est celle qui est mesurée au niveau de la nacelle, l'axe du moyeu (c'est-à-dire au centre des pales) et non la vitesse au sol. Le vent étant plus fort quand on prend de la hauteur, un vent ressenti comme nul ou très faible au sol est déjà modéré à hauteur de moyeu. A titre d'illustration, la différence entre le vent au sol et celui au moyeu est d'un à trois échelons sur l'échelle de Beaufort. (Voir taille et puissance des éoliennes)

En dessous de sa vitesse de démarrage, l'éolienne ne produit pas d'électricité, bien que le rotor puisse être légèrement en mouvement sans entraîner la génératrice et donc sans produire de l'électricité.

Cette rotation induite par un vent très faible permettra ensuite à l'éolienne de produire dès que la vitesse de démarrage sera atteinte.

Contrairement aux idées reçues, les éoliennes ne consomment donc jamais d'électricité pour entraîner la rotation des pales. Si l'éolienne tourne, c'est uniquement grâce à l'énergie cinétique du vent reçue par le profil aérodynamique des pales. Toutefois l'éolienne consomme, même quand elle ne tourne pas, une très faible quantité d'électricité pour sa consommation interne (systèmes informatiques, balisage lumineux, etc.), à hauteur d'environ 1 % de sa production moyenne annuelle. (Voir [consommation électrique interne de l'éolienne](#))

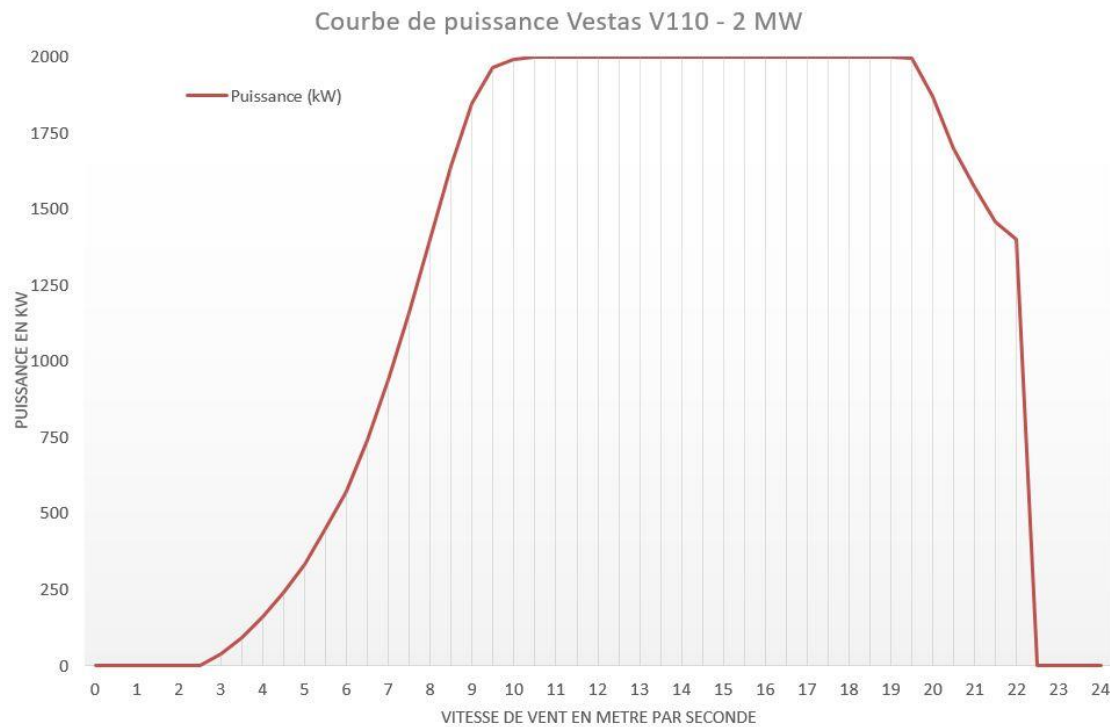
L'énergie du vent étant fonction du cube de sa vitesse, l'énergie produite par l'éolienne augmente donc rapidement selon la vitesse du vent. L'éolienne atteint sa puissance nominale (le maximum qu'elle puisse produire) pour sa **vitesse nominale** de vent. Cette vitesse se situe selon les modèles entre 10 et 13 m/s (soit 36 à 47 km/h). A partir de cette vitesse et au-delà, l'éolienne produit à la puissance maximum de sa génératrice (jusqu'à la vitesse d'arrêt).

Chaque éolienne est adaptée au site d'implantation. Les sites bien ventés sont équipés d'éoliennes plus robustes qui démarrent avec des vitesses de vent un peu plus élevées (ce sont des éoliennes de classe IEC : A ou B). A l'inverse, les sites moyennement ou faiblement ventés sont équipés d'éoliennes dont le rotor est plus grand et qui démarrent avec des vents plus faibles (Classe IEC : C ou S).

Les éoliennes sont prévues pour fonctionner jusqu'à une vitesse maximum de vent. Si le vent dépasse cette limite, elles ne peuvent plus produire d'électricité en toute sécurité et sans provoquer une usure accélérée des composants. Cette vitesse maximum dite **vitesse d'arrêt** dépend de la catégorie (IEC) et du modèle. La vitesse d'arrêt se situe aux alentours de 22 à 30 m/s (79 à 108 km/h) soit « tempête » sur l'échelle de Beaufort.

Lorsque le vent dépasse cette vitesse d'arrêt, l'éolienne positionne automatiquement son rotor face au vent et ses pales « en drapeau ». Les freins sont serrés. Dans cette configuration très rare, qui ne produit pas d'électricité, l'éolienne peut résister à des vents allant jusqu'à des tornades par exemple, de 52 à 66 m/s (187 à 238 km/h). Cette **vitesse de survie** est celle pour laquelle l'éolienne est prévue de résister dans les pires conditions.

Par exemple, pour l'éolienne Vestas V110 de 2 MW de puissance nominale (une éolienne classiquement installée en France), la courbe de puissance de ce modèle est la suivante :



Source : Constructeur Vestas - spécifications V110-2.0 MW - densité d'air 1,225 kg/m³

La production démarre à la **vitesse de démarrage** soit 3 mètres/seconde (m/s) de vent mais pour seulement 40 kW de puissance. Dès 6 m/s de vent, la puissance produite est de 574 kW et à 10,5 m/s de vent la **puissance nominale** est atteinte soit 2 000 kW (2 MW). Au-delà de 10,5 m/s, la puissance est automatiquement bridée à son maximum en modifiant l'orientation des pales pour conserver cette puissance nominale. A partir de 19,5 m/s, la puissance produite diminue pour protéger l'éolienne contre ces vents importants et à 22 m/s, la **vitesse d'arrêt** est atteinte, l'éolienne se met en sécurité et s'arrête. La **vitesse de survie** de l'éolienne, pour une rafale de 3 secondes, est de 52,5 m/s soit 189 km/h.

Le chiffre clé

11

L'éolienne commence à produire de l'électricité dès 11 km/h à hauteur de nacelle soit une légère brise.

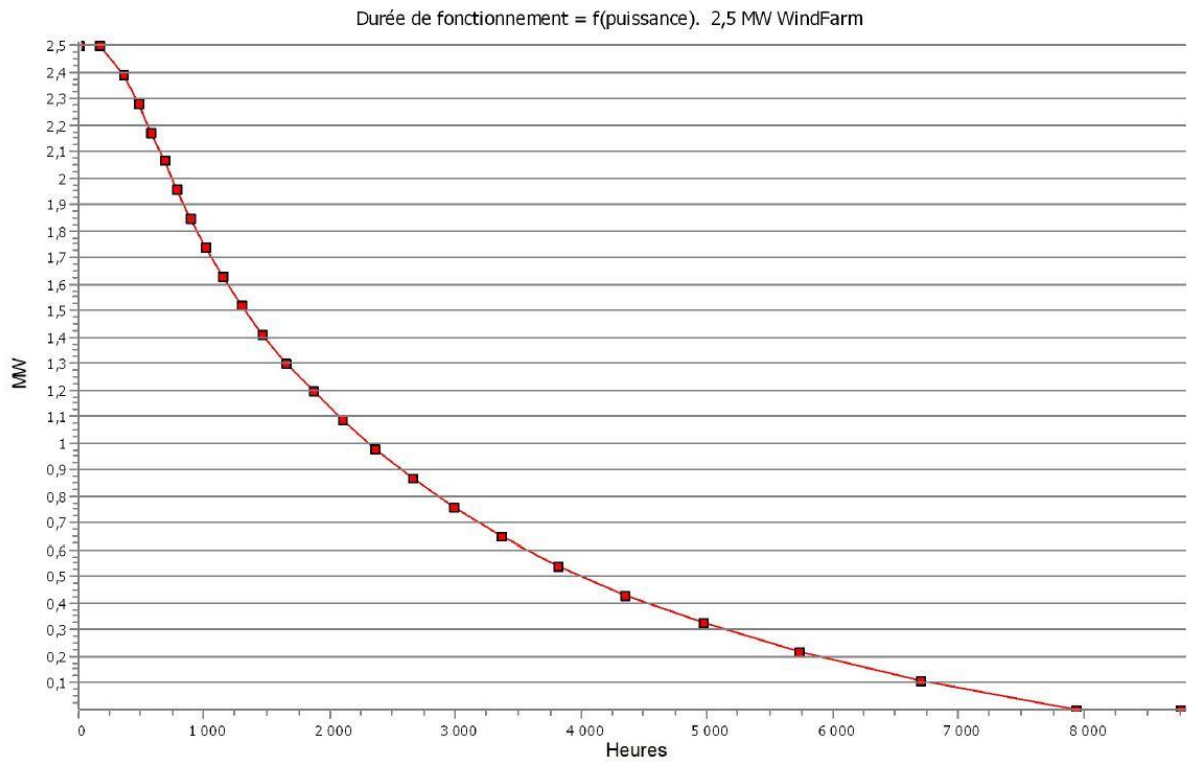
Le facteur de charge, c'est quoi au juste ?

Le facteur de charge est une notion importante lorsqu'on cherche à analyser la production d'une éolienne. Il s'agit du rapport entre la puissance maximale théorique d'une éolienne (c'est-à-dire sa production si le vent soufflait 100 % du temps à la vitesse nominale) et la production qui a effectivement lieu, au cours d'une année. L'exemple ci-dessous montre que sur une année, une éolienne produit de l'électricité pendant presque 90 % du temps. Mais cette production n'est pas toujours au niveau maximal que l'éolienne pourrait atteindre, faute de vent suffisant. Ainsi, il est fréquent qu'une éolienne produise de l'électricité, mais ne tourne pas à plein régime et donc ne produise qu'une portion de sa capacité maximale. Si on fait la moyenne du niveau de production électrique d'une éolienne sur une année, par rapport à ce qu'elle pourrait produire si le vent était toujours idéal, alors on obtient le fameux « facteur de charge ». Le facteur de charge moyen du parc éolien français entre 2012 et 2019 était de 22,5 %. Il varie entre 21 et 25 % selon les années. Mais cela ne veut pas dire que les éoliennes fonctionnent 25 % du temps, comme l'affirment certains détracteurs mal informés.

Le facteur (ou taux) de charge est une notion importante pour l'éolien d'autant qu'il est souvent confondu à tort avec le rendement ou le temps pendant lequel l'éolienne produit de l'électricité. Le vent est variable tout au long de l'année et les différences sont conséquentes entre l'hiver bien venté et l'été qui l'est moins. Le vent n'étant pas constant sur une année, une semaine ou une journée donc la production éolienne varie. (Voir [Variabilité de la production](#)).

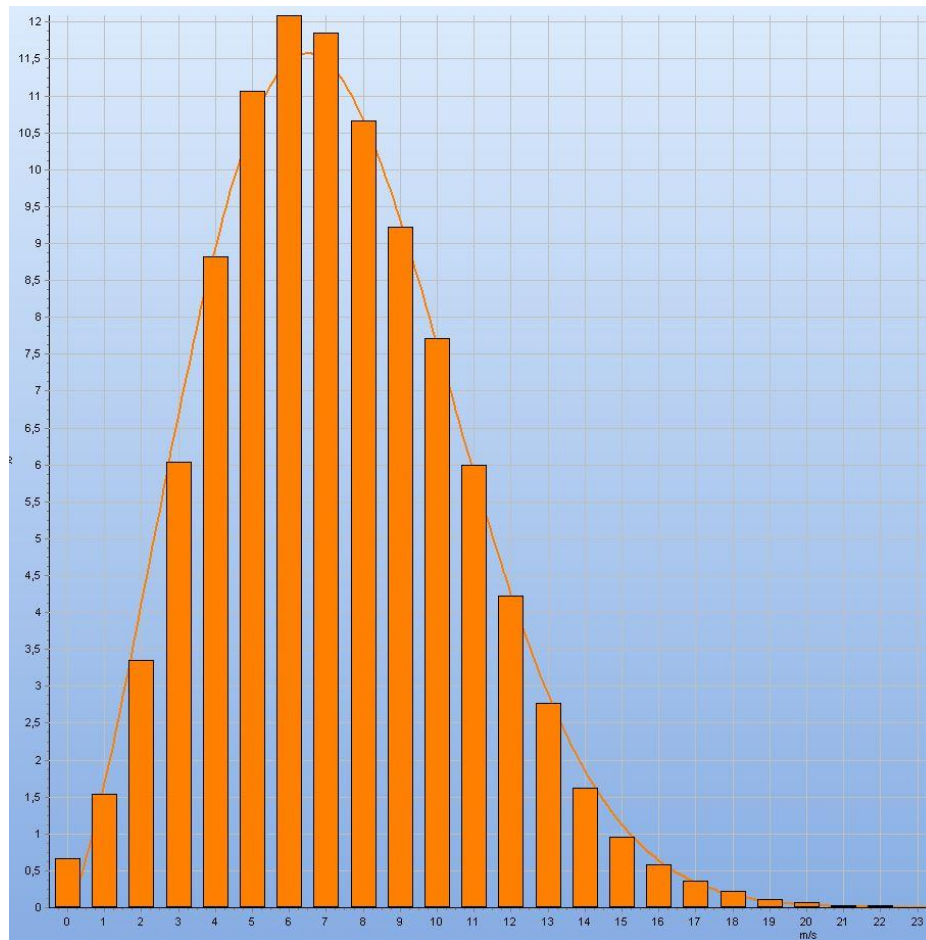
Pour comprendre l'évolution de la production de l'éolienne selon le vent et les termes vitesse de démarrage / nominale / d'arrêt, consultez la partie [courbe de puissance des éoliennes](#).

Pour un exemple concret, une éolienne Nordex N90, de 2,5 MW de puissance nominale, qui produit 6 000 MWh en moyenne annuelle. L'éolienne ne produit pas d'électricité quand le vent est en dessous de sa vitesse de démarrage (3 m/s) soit 9,5 % de l'année. Le reste du temps soit (90,5 % de l'année) l'éolienne produit de l'électricité mais à des puissances comprises entre quelques kW et sa puissance nominale de 2,5 MW. Cette puissance maximum est atteinte à partir de la vitesse nominale (12,5 m/s) (2 % de l'année). La vitesse d'arrêt n'est atteinte que très rarement (quasiment 0 % du temps). La plupart du temps (88,5 % de l'année) l'éolienne produit de l'électricité, mais en deçà de sa puissance nominale. La courbe suivante présente le cumul de la durée de fonctionnement en fonction de la puissance produite. En abscisse, on retrouve les 8760 heures d'une année (24 h x 365 jours). En ordonnée, c'est la puissance atteinte par l'éolienne.



Source : Logiciel Windpro, exemple de répartition de la production selon les 8760 heures de l'année

Une autre représentation souvent utilisée est la courbe de Weibull qui présente la répartition statistique par vitesse de vent (axe horizontal) et en % du temps sur l'année (axe vertical).



Source : Logiciel Windpro 3.3, exemple de courbe de Weibull

La production théorique est réduite par la dévente des éoliennes voisines (c'est-à-dire que la présence d'autres éoliennes proches, qui vont réduire l'énergie disponible pour les autres éoliennes) et par les arrêts et bridages nécessaires pour la maintenance et l'exploitation. Voir chapitre **Quand les éoliennes ne tournent pas**. Une fois corrigée d'environ 12 % de pertes, dont environ 5 % d'arrêts, la production atteint 5 280 MWh.

« Le facteur de charge est le rapport entre l'énergie effectivement produite sur une période donnée par l'installation et l'énergie qu'elle aurait produite si elle avait fonctionné à sa puissance nominale durant toute la période. Il varie selon le lieu d'implantation et le type d'éolienne utilisée. » Source : Ademe - Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie – Rapport complet – 09/2017 (p.97)

Pour mesurer la production totale, on observe le cumul annuel de la production, indépendamment des variations. Par mesure de simplicité on ramène cette production à un équivalent de la puissance nominale. La simplification revient à diviser la production, en MWh, par la puissance nominale, ici 2,5 MW. Pour notre exemple, une production annuelle de 5 280 MWh, divisée par 2,5 MW, donne comme résultat 2 112 heures de production à pleine puissance. Une année compte 8 760 heures. On a alors comme résultat $2\,112 / 8\,760 \text{ heures} = 24,1 \%$, qui est le facteur de charge pour cet exemple.

L'idée fautive selon laquelle une éolienne ne produirait qu'un quart du temps vient donc d'une mauvaise compréhension du concept de facteur de charge. Une éolienne produit en fait de l'électricité environ 85 % du temps (en tenant compte des arrêts et bridages), mais pas toujours au maximum de

sa puissance. Le facteur de charge moyen du parc éolien français entre 2012 et 2019 est de 22,5 % il varie entre 21 et 25 % selon les années.

« Le facteur de charge éolien mensuel moyen, de 24,7 %, est en augmentation par rapport à celui de 2018 (22,8%). » Source : RTE – Bilan électrique 2019 (p.51)

RTE calcule le facteur de charge en comparant la production totale de l'année et la puissance installée en fin d'année. Cette méthode de calcul est défavorable à l'éolien, puisque la puissance installée augmente fortement chaque année. Ce facteur de charge varie en fonction de la moyenne de vent annuel, il est proche du facteur de charge moyen européen pour l'éolien terrestre.

« Le facteur de charge moyen en Europe est de 26 % soit 24 % pour l'éolien terrestre et 38 % pour l'éolien offshore. » Source : Wind Europe – Wind energy in Europe in 2019 (p.18)

Les éoliennes plus récentes sont plus performantes et ont donc un meilleur facteur de charge, principalement grâce à des dimensions plus importantes (diamètre et hauteur) et à une meilleure efficacité technologique ainsi qu'une maintenance optimisée (**Voir taille et puissance des éoliennes**). Le facteur de charge moyen a donc tendance à augmenter en moyenne.

Le chiffre clé

85%

Une éolienne produit de l'électricité environ 85 % du temps mais cette production n'est pas nécessairement toujours au niveau maximal par rapport à la puissance de l'éolienne. On calcule alors le facteur de charge en faisant le rapport entre cette production maximale théorique et la production qui a effectivement eu lieu, sur une année.

Quel est le facteur de charge par type d'énergie ?

Une analyse des facteurs de charge des moyens de production d'électricité indique qu'en moyenne, le facteur de charge du parc électrique français était de 45 % en 2019. Les spécificités du parc français donnent la priorité aux centrales nucléaires, qui ont été prévues pour être exploitées en continu. Ainsi, le facteur de charge du nucléaire était de 69 % en 2019. Les énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz), mais aussi l'hydraulique de barrage, sont utilisés notamment pour répondre aux fortes demandes en électricité, donc de manière ponctuelle, ce qui explique leur faible facteur de charge. Concernant l'hydraulique, il faut également considérer la pluviométrie, qui influencera la capacité de production.

Le facteur de charge de l'éolien français était de 24,7 % en 2019, il dépend du gisement de vent donc des variations annuelles. (Voir **facteur de charge de l'éolien**). On peut le comparer au facteur de charge des autres moyens de production d'électricité, mais il faut tenir compte des particularités de chacun. Un facteur de charge de 100 % n'est en pratique pas atteignable car cela reviendrait à faire tourner une centrale électrique au maximum de sa puissance toute l'année sans interruption. Il faut a minima considérer les arrêts nécessaires pour la maintenance, par exemple.

Le facteur de charge moyen du parc électrique français en 2019 était de 45 %.

Parc électrique français en 2019	Facteur de charge
Nucléaire	69 %
Cumul thermiques fossile	26 %
...dont charbon	6 %
...dont fioul	8 %
...dont gaz	36 %
Hydraulique	27 %
Eolien	24 %
Solaire	14 %
Bioénergies (biogaz, biomasse, déchets)	53 %
Moyenne pondérée	45 %

Source des données : RTE - Bilan électrique 2019

Le facteur de charge du nucléaire est élevé car les centrales sont prévues pour être exploitées en continu à un niveau de puissance proche du maximum. Il faut toutefois prévoir des arrêts pour :

- Changer le combustible (environ tous les 3 ans) et pour la maintenance.
- Les opérations de rénovation lourdes comme le grand carénage afin de rendre l'exploitation des centrales au-delà de 40 ans et pour tenir compte des nouvelles normes de sécurité post Fukushima.
- En cas d'incident ou de défaut, de mise en sécurité ou pour éviter de trop augmenter la température de l'eau des rivières pour les centrales qui en dépendent.

Le parc nucléaire français étant vieillissant, son facteur de charge a tendance à diminuer. Il était par exemple de 76 % en 2011, soit 6 % au-dessus de celui de 2019. En juillet 2022 il n'était plus que de 53 % avec les problèmes techniques rencontrés et les maintenances post-Covid.

Le facteur de charge des énergies thermiques fossiles est faible parce qu'elles servent en France comme énergies d'appoint, en période de pointe. C'est-à-dire qu'on utilise ces moyens de production

pour compléter la production électrique quand il y a une forte demande d'électricité ponctuelle. La priorité de la production est donnée aux énergies qui émettent le moins de CO₂ donc les énergies renouvelables mobilisables, comme l'hydraulique.

Pour l'hydraulique, le facteur de charge dépend de la pluviométrie annuelle ainsi que des stocks d'eau restant de l'année précédent pour les barrages (hydraulique des lacs).

A l'instar de l'éolien, le facteur de charge du solaire dépend d'une source naturelle dont les variations annuelles sont plus homogènes que pour le vent. Considérant un niveau de production maximum atteint pour un bon ensoleillement et une production nulle la nuit, le facteur de charge est de 14 %. Par ailleurs, le niveau d'ensoleillement français est modéré comparé à d'autres pays et les différences de gisement entre régions sont importantes.

Le chiffre clé

45 %

Le facteur de charge moyen du parc électrique français en 2019 était de 45 %.

La variabilité de la production pose-t-elle un problème ?

La production d'un parc éolien varie en fonction du vent. Mais cette variabilité ne pose pas un problème insurmontable. D'abord parce que la France bénéficie de quatre régimes de vent distincts : Manche, Mer du Nord, front atlantique et zone méditerranéenne. Ainsi, au moins une zone est toujours exposée à un vent intéressant, grâce auquel le parc français produit régulièrement. Ensuite, grâce aux données de Météo France, il est facile de connaître la puissance du vent et la production des éoliennes 3 jours en avance. L'intégration de cette électricité dans le réseau est donc aisée, puisqu'on peut la prévoir. Enfin, la variabilité au gré des saisons est avantageuse : en effet, c'est en hiver que le vent souffle le plus fort et c'est également à cette période de l'année que la consommation électrique augmente en France. L'éolien contribue donc à la régulation des pics de consommation électrique, qui arrivent le plus souvent en hiver, en fin de journée.

Les trois énergies renouvelables électriques majoritaires (hydraulique, éolien et solaire) varient selon la disponibilité de leur ressource. Ces dernières fluctuent pendant une même journée mais également selon la saison et d'une année à l'autre. Le photovoltaïque produit davantage en été qu'en hiver et au maximum en milieu de journée mais pas du tout la nuit. L'hydraulique varie selon la pluviométrie et le débit des cours d'eau. La production d'une éolienne varie selon les conditions de vent. (**Voir courbe de puissance**).

Effet de foisonnement

Le territoire français est exposé à quatre régimes de vent distincts : Manche, mer du Nord, front atlantique et zone méditerranéenne.

« Sur la totalité de la France continentale, quatre zones de vent homogènes peuvent être identifiées. Cette diversité au sein du territoire permet ainsi d'avoir des centrales éoliennes en fonctionnement quasiment à tout moment. » Source : RTE – Bilan électrique 2018 (p.70)

Ces zones bénéficient de vents non-corrélés, ce qui est un avantage considérable pour l'éolien français. En effet, la quasi-totalité du temps, au moins une zone est exposée à un vent intéressant, de sorte que le parc éolien produit régulièrement. Certains pays qui disposent d'un unique régime de vent voient leur parc éolien produire uniformément ou être très faible à certains moments.

« La France bénéficiant de plusieurs régimes de vent, l'effet de foisonnement géographique a tendance à compenser la variabilité de la production éolienne impactée par les conditions de vent » Source : RTE – Bilan électrique 2018 (p.47)

Prédiction de la production

RTE, à l'aide des données de Météo France et en se basant sur son expérience, prévoit très finement la production éolienne 3 jours en avance et affine ses prévisions chaque jour puis au pas horaire. La production éolienne, bien que non commandable, est prévisible et ne pose pas de problème d'intégration dans le mix de production électrique.

« Le foisonnement permet de prévoir la production avec une précision suffisante pour assurer une bonne gestion par RTE de l'équilibre entre l'offre (la production par l'ensemble du mix électrique) et la demande (la consommation) électrique. » Source : Ademe – Les avis de l'Ademe l'énergie éolienne – 04/2016

La marge d'erreur entre les prévisions de production éolienne et la production réelle est très faible. Elle est bien inférieure à la marge d'erreur entre l'estimation des consommations nationales et les consommations réelles. Les données de prévision de RTE sont disponibles sur le site : <https://data.rte-france.com/>

« Prévisions de production éolienne en fonction des vents : comment arrivons-nous à ces prévisions ? En partie grâce à Météo France qui nous fournit en permanence les prévisions de vent à J+3, heure par heure. Informations que nous croisons avec l'implantation de nos parcs éoliens. Notre outil de prévision Préole peut alors calculer le volume que produira chaque parc dans les heures, voire les jours à venir. »

Source : site RTE et vous : <https://www.rte-et-vous.com/fr/article/toujours-un-temps-d-avance>

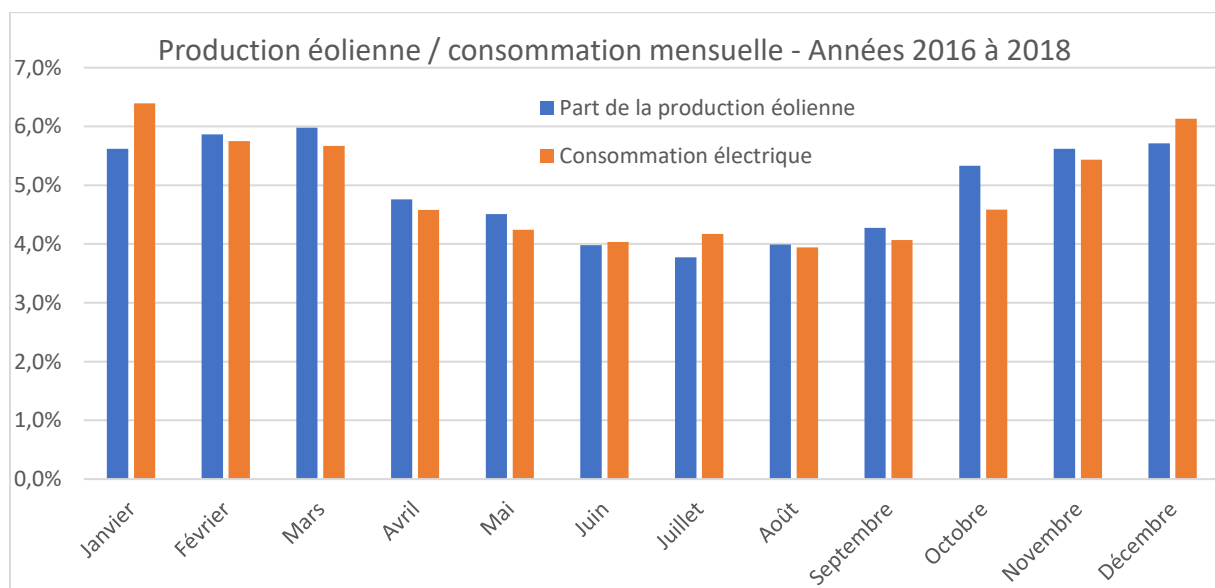
En Europe, 6 pays couvrent plus de 15 % de leur consommation électrique grâce à l'énergie éolienne. Ce chiffre monte à 50% pour le Danemark. (Voir l'éolien en Europe). L'intégration de cette énergie dans le réseau électrique est donc possible, même pour des taux élevés de contribution.

Chaque pays dispose d'un mix électrique composé de plusieurs sources de production. Un réseau qui serait alimenté uniquement par de l'éolien serait problématique, mais cela n'est évidemment pas un objectif. Les critiques évoquant un réseau électrique alimenté par un unique type de production ne sont pas constructives.

Contribution aux périodes de forte consommation

L'éolien, bien que non commandable, participe activement aux périodes de forte consommation et aux pics de consommation électriques. Les mois d'hiver sont caractérisés par une forte consommation électrique, ce sont aussi des mois bien ventés donc à forte production éolienne. Sur le graphique suivant, on visualise la part de la production éolienne par rapport à la consommation électrique mensuelle.

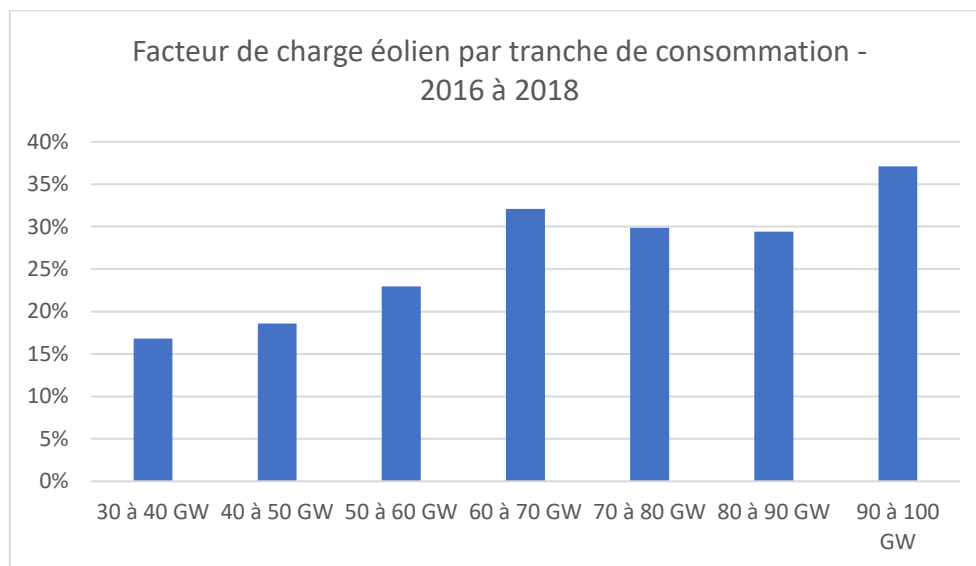
La production éolienne moyenne (en bleu) suit de façon assez proche la consommation électrique mensuelle (en orange).



Source : RTE données Eco₂mix pour les années 2016 à 2018

« La contribution de l'éolien au passage des pointes de consommation est nécessaire » Source : RTE Bilan prévisionnel 2017 de l'équilibre offre demande d'électricité en France (p.279)

L'éolien contribue à la régulation des pics de consommation électrique qui arrivent le plus souvent en hiver en fin de journée. Les pics de consommation estivaux sont bien plus faibles que ceux hivernaux. Pour les années 2016 à 2018, la consommation électrique française a varié entre un minimum de 30 GW et un maximum de 97 GW. En catégorisant la consommation par tranche de 10 GW, on peut comparer le facteur de charge éolien moyen sur ces périodes. On constate que plus la consommation est élevée, plus le facteur de charge de l'éolien est important. L'éolien contribue donc activement à la production électrique lors des passages des pointes de consommation nationales.



Source : RTE données Eco2mix pour les années 2016 à 2018 - www.rte-france.com/fr/eco2mix/eco2mix

Meilleure intégration au mix électrique

L'intégration d'une part croissante d'énergies renouvelables au réseau électrique est un enjeu de stabilisation d'avenir. C'est également le cas des nouveaux modes de consommation, de l'efficacité énergétique et des réseaux intelligents (smart grids). Les professionnels du réseau électrique, RTE, Enedis, les industriels et les universités françaises travaillent sur des programmes de recherche pour concevoir les futures évolutions du réseau électrique.

Le chiffre clé

4

La France bénéficie de quatre régimes de vent distincts : Manche, Mer du Nord, front atlantique et zone méditerranéenne. Ainsi, au moins une zone est toujours exposée à un vent intéressant, grâce auxquelles le parc français produit régulièrement.

Pourquoi cette éolienne ne tourne pas alors qu'il y a du vent ?

En moyenne, les éoliennes ne sont arrêtées que 15 à 20 % du temps : elles produisent donc de l'électricité plus de 80 % de l'année. Lorsqu'elles sont à l'arrêt, les explications peuvent être multiples. Le vent peut être trop faible, perturbé, ou rarement, trop fort s'il y a une tempête. Dans d'autres cas, des maintenances ont lieu : ces dernières sont prioritairement programmées pendant les périodes de faible vent. Certains arrêts s'expliquent aussi pour des questions de biodiversité : les éoliennes sont parfois mises à l'arrêt pendant des périodes de migration d'oiseaux, ou les nuits d'été pendant les périodes d'activité des chauves-souris. Enfin, des phénomènes très rares, comme le gel des pales ou des défaillances du réseaux, peuvent être à l'origine d'un arrêt de l'éolienne.

Les éoliennes tournent et produisent de l'électricité plus de 80 % du temps, en moyenne sur l'année. (Voir facteur de charge de l'éolien). Cela correspond aux périodes où le vent est suffisant pour permettre une production d'électricité comprise entre le minimum et la puissance maximum de l'éolienne. Toutefois, d'autres facteurs peuvent expliquer l'arrêt des éoliennes que l'on peut regrouper en plusieurs catégories.

Un schéma simplifié permet de représenter les situations classiquement rencontrées :

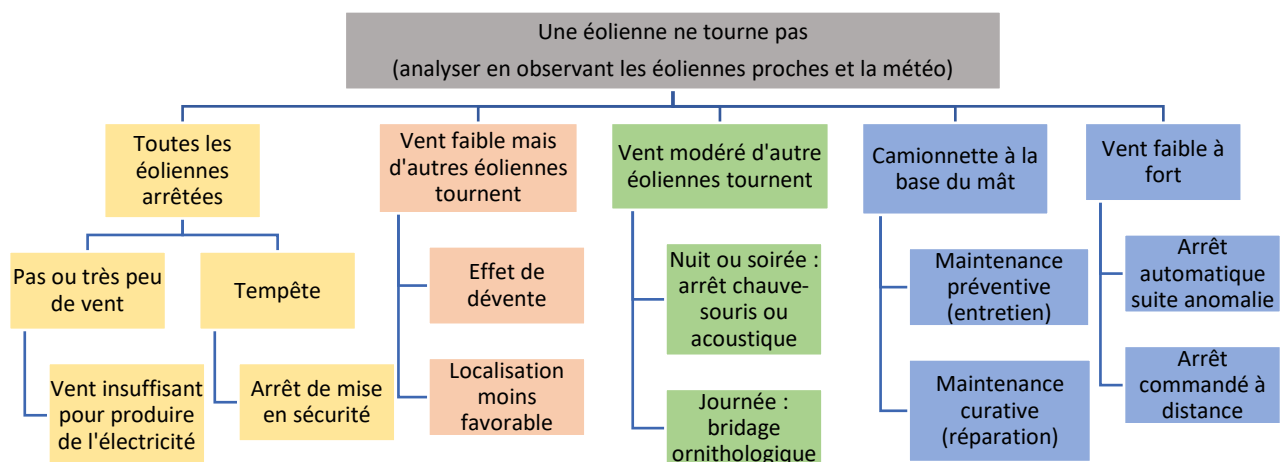


Schéma des raisons pour lesquelles une éolienne peut être à l'arrêt – Source : Eolise

Vent trop faible ou tempête

Quand il n'y a **pas de vent** ou un vent trop faible, l'éolienne est à l'arrêt, ce qui se produit environ 10 % du temps dans l'année. A l'inverse quand le vent est trop important, dans de très rares cas de **tempête**, l'éolienne est automatiquement mise en sécurité et à l'arrêt. Cette situation arrive moins de 0,1 % du temps dans l'année. (Voir facteur de charge de l'éolien).

Perturbation locale du vent

L'**effet de dévente** interne d'un parc éolien est à prendre en compte dès qu'une éolienne n'est pas isolée. Chaque éolienne récupère une partie de l'énergie cinétique du vent de sorte que dans son sillage, le vent est moins énergétique et plus perturbé qu'en amont du rotor. Ce phénomène très local n'empêche pas le vent de se reconstituer rapidement, mais il exerce une influence sur les éoliennes d'un même parc éolien. Pour des conditions de vent faible, une éolienne dans le cône de dévente (l'ombre en quelque sorte) d'une ou plusieurs autres éoliennes peut ne pas tourner.

La **localisation moins favorable** d'une éolienne influe sur le vent qu'elle reçoit. Au sein d'un même parc éolien, toutes les éoliennes ne disposent pas du même gisement indépendamment de l'effet de dévente. Pour une vitesse de vent faible, une éolienne située plus bas ou derrière un obstacle peut recevoir moins de vent que d'autres mieux situées et pas assez pour tourner alors que le reste du parc est en production. En fonction de l'orientation du vent, des éoliennes différentes peuvent se trouver dans cette situation moins favorable.

Maintenance et arrêts automatiques

La **maintenance** curative et préventive des éoliennes nécessite des arrêts qui sont soit automatiques soit programmés, permettant aux techniciens d'intervenir sur l'éolienne. Les contrats de maintenance des installateurs et des entreprises spécialisées prévoient un maximum d'arrêt, généralement 3 % du temps en moyenne annuelle.

La **maintenance préventive** comprend toutes les opérations d'entretien et de contrôles réguliers nécessaires pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité des installations. Elle inclut des changements de consommables ou de pièces. Elle comprend également des améliorations mineures logicielles ou techniques. Les interventions étant programmées, les périodes de vents faibles sont privilégiées afin de ne pas pénaliser la production.

L'**arrêt automatique peut intervenir**, à la suite de la détection d'une anomalie par le logiciel de contrôle de l'éolienne. Il existe de nombreux processus de sécurité grâce à des capteurs redondants dont les données sont interprétées en continu par le système de contrôle. Dès qu'une anomalie ou une défaillance est détectée, l'éolienne est automatiquement mise à l'arrêt par sécurité. Le centre de maintenance qui pilote les éoliennes à distance peut décider, après analyse de la situation, de redémarrer l'éolienne après correction ou de faire intervenir une équipe de maintenance sur site.

La **maintenance curative** comprend les interventions sur une éolienne après un arrêt automatique ou une panne à réparer. Ces arrêts sont dommageables pour la production de l'éolienne qui peut être arrêtée plusieurs heures voire plusieurs jours. C'est donc la maintenance préventive qui permet de limiter autant que possible les défauts sur les éoliennes.

Lors de l'intervention d'une équipe de techniciens de maintenance, l'éolienne est mise à l'arrêt dès que les techniciens entrent dans le mât et la nacelle pour des raisons de sécurité. Cette situation est identifiable par la présence d'une camionnette de maintenance à la base du mât. Les éoliennes plus anciennes nécessitent davantage de maintenance et sont donc plus régulièrement arrêtées pour cette raison.

Bridage avec arrêt complet

Dans certaines conditions d'exploitation, une éolienne peut être arrêtée volontairement selon un **programme d'arrêt** dont les conditions sont définies.

Pour certains sites sensibles, la mise en place d'un **programme d'arrêt chiroptère** (chauves-souris) peut s'avérer nécessaire. C'est-à-dire que l'éolienne est arrêtée volontairement pour la protection des chauves-souris. Les conditions d'activité des chauves-souris sont connues, il s'agit par exemple des premières heures après le coucher du soleil en été au-dessus d'une certaine température. Certains systèmes permettent également de détecter en continu l'activité environnante des chiroptères pour arrêter l'éolienne quand c'est nécessaire.

Un **plan de bridage acoustique** est parfois mis en place afin que les émissions acoustiques du parc soient abaissées et respectent à tout instant les normes en vigueur. Une éolienne bridée fonctionne

dans un régime qui produit volontairement moins d'énergie que ce qui pourrait être possible. Cela permet de réduire la puissance de la génératrice et/ou la vitesse de rotation pour baisser le niveau d'émission sonore de l'éolienne. Il est possible qu'un plan de bridage prévoit l'arrêt d'une éolienne dans certaines conditions.

Un **programme d'arrêt ornithologique** peut être mis en place pour des sites sensibles pour certaines espèces d'oiseaux. En fonction des espèces, les arrêts peuvent être programmés pour des passages migratoires, des périodes de reproduction ou de sortie de juvéniles. Les conditions d'arrêts peuvent dépendre d'une période identifiée, d'observations sur site par des ornithologues professionnels ou amateurs ou d'un système de détection dédié.

L'application d'un **plan d'arrêt** spécifique voire d'un cumul implique des périodes d'arrêts qui peuvent représenter quelques dizaines voire centaines d'heures dans l'année. Toutes les éoliennes d'un parc ne sont pas obligatoirement soumises au même plan d'arrêt.

Conditions exceptionnelles

Certaines conditions exceptionnelles peuvent impliquer l'arrêt d'une éolienne. Par exemple en cas de gel détecté sur les pales des éoliennes, ce qui est automatiquement identifié par le système de contrôle. Dans ce cas, l'éolienne est mise à l'arrêt en attendant le dégel sur les pales. Les situations de gel d'une éolienne sont plutôt rares en France, de sorte que les systèmes dédiés aux pays très froids, comme le chauffage des pales, y sont très peu déployés. Le temps d'**arrêt pour gel** dépend fortement des conditions climatiques et donc de la localisation de l'éolienne.

Les très rares situations de **défaillance du réseau électrique** empêchent l'évacuation de l'électricité produite. Dans ce cas, l'éolienne est mise à l'arrêt à défaut de pouvoir évacuer sa production sur le réseau national. Le réseau électrique français est particulièrement fiable grâce à l'expertise des entreprises de transport (RTE) et de distribution de l'électricité (Enedis et ELD). Cette situation est donc très rare et se présente moins de 0,01 % du temps.

Enfin, lorsque la production électrique est supérieure à la demande au niveau européen il peut arriver ponctuellement que le **prix de l'électricité soit négatif**. Dans ce cas, il est nécessaire d'arrêter les moyens de production qui le peuvent, ce qui est le cas de l'éolien. Dans cette situation rare, les éoliennes peuvent être arrêtées pour ne pas produire d'électricité alors que des moyens comme le nucléaire ne peuvent être arrêtés sur des périodes courtes.

Le chiffre clé

12

Une douzaine de motif peuvent expliquer la raison de l'arrêt d'une éolienne et pas uniquement le manque de vent.

Impact écologique de l'éolien



Les éoliennes émettent-elles des gaz à effet de serre ?

Face à l'urgence climatique, l'éolien est un allié de poids puisque c'est une énergie qui émet très peu de gaz à effet de serre. Une analyse du cycle de vie d'une éolienne, qui va de la fabrication des composants jusqu'au recyclage de l'éolienne, montre que la production d'électricité d'une éolienne émet seulement 12,7 grammes de CO₂ équivalent par kilowattheure. Ce chiffre est notamment dû à la fabrication des composants, car pendant la phase d'exploitation, une éolienne ne nécessite pas de combustible et n'émet pas de CO₂ ou d'autres gaz à effet de serre. Elle n'émet pas non plus de polluants atmosphériques, de particules fines ou de déchets nucléaires. A titre de comparaison, le gaz émet environ 500 grammes de CO₂ et le charbon environ 1000 g de CO₂. Chaque parc éolien construit permet d'éviter de larges quantités d'émissions de gaz à effet de serre.

Cycle de vie de l'éolienne

Fin 2015, Cycleco a réalisé pour l'Ademe une étude du cycle de vie complet d'une éolienne. Ce cycle comprend la fabrication des composants, le transport, la construction, la phase d'exploitation incluant la maintenance, la désinstallation et le recyclage de l'éolienne. Le constat est très positif pour la filière éolienne. Au cours de sa première année d'exploitation, une éolienne rembourse l'ensemble de l'impact CO₂ de son cycle de vie et l'énergie nécessaire à sa construction. L'étude Cycleco de l'Ademe trouve un résultat conservateur de 12 mois, alors que l'analyse des constructeurs donne des chiffres dans une fourchette de 6 à 9 mois de retour énergétique.

« En d'autres termes, sur une durée de vie de 20 ans, une éolienne produit 19 fois plus d'énergie qu'elle n'en nécessite pour sa construction, son exploitation et son démantèlement. » Source : Cycleco pour l'Ademe – Rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'éolien français – 12/2015

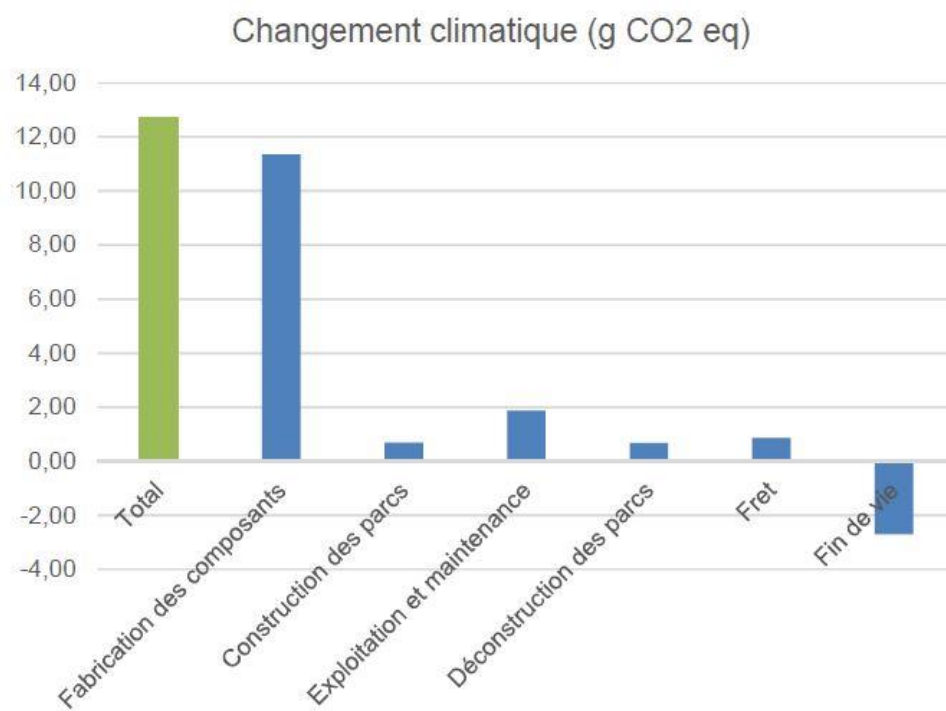
« Eolien terrestre : le temps de retour énergétique est de 12 mois et le facteur de récolte de 19.

Retour énergétique : Le retour énergétique permet d'obtenir le taux de rendement énergétique, c'est-à-dire en combien de temps la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.

Facteur de récolte : Le facteur de récolte permet de connaître le nombre de fois que l'énergie est amortie, c'est-à-dire le nombre de fois que la turbine produit la quantité d'énergie qu'elle a consommée au cours de son cycle de vie.»

Source : Ademe - Cycleco – Impacts environnementaux de l'éolien français – Données 2015

C'est la fabrication des composants qui concentre la grande majorité de l'impact en CO_{2eq} nécessaire au cycle de vie de l'éolienne.



Source : Cycleco pour l'Ademe – Rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'éolien français – 12/2015 (p.39)

Taux de CO₂ émis par kWh

Durant sa phase d'exploitation, l'énergie éolienne a un niveau d'émission de CO₂ très faible. En effet l'éolienne ne nécessite pas de combustible et n'émet pas de CO₂ ni de gaz à effet de serre. Elle n'émet pas non plus d'autres polluants atmosphériques tels que SO₂, Nox, particules fines ou déchets nucléaires. Elle ne consomme pas d'eau, contrairement aux moyens de production classique qui en utilise de grandes quantités dans leur processus de refroidissement. Les opérations de maintenance, qui nécessitent des trajets en véhicule, sont les principales sources d'émission de CO₂ pendant la phase d'exploitation.

Quand on tient compte de l'ensemble de la durée de vie d'une éolienne (soit 20 années), les émissions sont estimées à 12,7 grammes de CO₂ équivalent par kilowattheure (gCO₂ eq/kWh). Précisons que la durée de vie d'une éolienne récente est désormais de 25 voire 30 ans, ce qui réduit encore ce taux d'émission.

Emissions de CO₂ par kilowattheure des différentes énergies

Type d'énergie	g CO ₂ eq par kWh
Charbon	900 – 1200
Pétrole	780 – 900
Gaz naturel	400 – 500
Photovoltaïque	50 – 100
Nucléaire	15 – 50
Hydroélectrique	15 – 40

Source : Cycleco pour l'Ademe – Rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'éolien français – 12/2015 (p.73)

Entre 2012 et 2018, le taux moyen d'émissions de gaz à effet de serre, toutes énergies confondues, était de 54 gCO₂ eq/kWh en France. Ce taux est plus bas que la moyenne européenne grâce à la part importante du nucléaire français dans le mix électrique (dont les déchets radioactifs ne sont pas comptabilisés en équivalent CO₂). L'éolien a donc un taux d'émission de CO₂eq/kWh 4 fois inférieur à la moyenne du parc électrique français.

L'énergie éolienne vient compléter la production bas carbone du nucléaire, mais pas la substituer, comme le confirme constamment le gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité. L'avantage en termes de baisse de CO₂ est donc conséquent.

« Aujourd'hui, l'énergie éolienne et l'énergie solaire se déploient donc essentiellement en addition au potentiel de production nucléaire et hydraulique. »

« Ces résultats battent en brèche une vision réductrice du système électrique où chaque incrément de production éolienne et solaire se ferait au détriment du nucléaire et n'aurait pas d'influence sur les émissions de gaz à effet de serre. »

Source : RTE – Note : Précisions sur les bilans CO₂ établis dans le bilan prévisionnel et les études associées. 2019

L'augmentation constante de la part de l'éolien et du photovoltaïque dans le mix électrique permet de se passer de moyens de production d'électricité très polluants comme le charbon et le fioul. Chaque kWh d'énergie fossile remplacé par un kWh éolien permet d'éviter plusieurs centaines de grammes CO₂eq. Voir [Interaction entre éolien et charbon/fioul](#). Il faut également tenir compte des interconnexions avec les autres pays européens dont le mix électrique est plus carboné ; les énergies renouvelables françaises remplacent également des énergies fossiles d'autres pays et inversement, selon les périodes.

« La production éolienne permet d'éviter le recours aux centrales thermiques à combustibles fossiles et contribue ainsi à diminuer les émissions de CO₂ directes pour la production d'électricité. » Source : Ademe – Les avis de l'Ademe l'énergie éolienne – 04/2016

Chaque kWh éolien permet d'éviter entre **500 et 600 grammes de CO₂eq** (ce calcul de l'Ademe se base sur l'historique du mix électrique réellement substitué par l'éolien). Avec la fermeture progressive en France des moyens de production d'électricité les plus émetteurs de CO₂, ce taux d'évitement a tendance à baisser. Le taux conservateur qui est généralement utilisé est celui de **300 gCO₂eq par kWh d'éolien**.

« La production éolienne contribue donc fortement à la réduction des émissions de SO₂, NOx et particules fines associées à la production d'énergie en France. » Source : Ademe – Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie – rapport complet – 09/2017 – (p.177)

Le chiffre clé

13

Une analyse du cycle de vie d'une éolienne, qui va de la fabrication des composants jusqu'au recyclage de l'éolienne, montre que la production d'électricité d'une éolienne émet seulement 12,7 grammes de CO₂ équivalent par kilowattheure.

Comment les éoliennes sont démantelées et recyclées ?

En fin de vie, les éoliennes sont totalement démantelées et 90 % des matériaux qui les composent sont recyclés. Les fondations en béton et en acier sont totalement décaissées. La remise en état totale des sites est prévue et encadrée par la réglementation française. Si on s'intéresse au recyclage de l'ensemble des matériaux, on constate que le béton utilisé dans les fondations peut être facilement réutilisé dans d'autres chantiers. De même, le recyclage des métaux utilisés (acier, fonte, cuivre, aluminium) ne pose pas de difficulté, ces derniers étant revendus pour financer en partie les travaux de démantèlement. Enfin, les matériaux composites utilisés pour les pales et la coque de la nacelle sont revalorisées énergétiquement, par l'incinération en cimenterie principalement. Leur recyclage représente l'enjeu le plus important pour la filière éolienne.

Processus de démantèlement

97 % des matériaux composants l'éolienne sont aisément recyclables en fin de vie, 90 % si l'on exclut la fondation. En effet, ces matériaux sont classiques dans l'industrie et la construction : de l'acier, des métaux comme le cuivre ou l'aluminium et du béton (incluant le ferrailage également en acier). Le processus de démantèlement d'une éolienne est globalement l'inverse du chantier de construction.

- Une grue est amenée sur site pour procéder à la dépose du rotor puis de la nacelle.
- Les différentes sections du mât sont également désassemblées avant évacuation.
- Les fondations sont excavées en totalité, conformément à la réglementation en vigueur.
- Les chemins et les plateformes sont décaissées sur la totalité de leur profondeur, généralement 30 à 40 cm.
- De la terre agricole de qualité équivalente à celle environnante est amenée pour remettre en état le site et le rendre à son usage précédent.

La France dispose d'un retour d'expérience limité dans le démantèlement des parcs éoliens, car les premières éoliennes de tailles importantes arrivent tout juste en fin de vie. Toutefois les compétences et équipements nécessaires sont classiques dans le BTP et les entreprises françaises existent déjà : les sociétés Soledra du groupe Lhotellier ou Valrea sont positionnées sur ce marché en devenir. Par ailleurs, l'expérience internationale est également profitable, bien qu'il faille l'adapter à la réglementation française plus stricte.

Réglementation

Le Code de l'Environnement prévoit spécifiquement les conditions et garantie de démantèlement pour les parcs éoliens. **Voir démantèlement des fondations pour plus de détail.**

Source : Arrêté du 26 août 2011 relatif à la remise en état et à la constitution des garanties financières pour les installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent. (modifié en décembre 2021)

Par ailleurs, la remise en état des sites en fin de vie est encadrée par la Préfecture car les parcs éoliens sont des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE).

Volume des matériaux à recycler

La fondation en béton armé représente la masse la plus importante, plus de 3 fois supérieure à celle de l'aérogénérateur. Environ 75 % de la masse de l'éolienne est composée d'acier, dans le cas très majoritaire des mâts en acier (environ 90 %). Les masses de composites, type fibre de verre voire de

carbone, représentent environ 2 % du total ; il s'agit du poids des pales et d'une partie de la coque de la nacelle.

Composition des matériaux pour une éolienne classique asynchrone avec mât acier :

Matériaux	Composants	Poids
Béton	Fondation	75 %
Acier	Mât et ferrailage des fondations, multiplicateur, génératrice, roulements	18,9 %
Fonte	Moyeu génératrice	3,5 %
Composite	Pales et structure nacelle	1,8 %
Cuivre	Câbles, génératrice, transformateur	0,5 %
Aluminium	Pièces diverses en nacelle, câbles	0,3 %

Source des chiffres : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.21)

« Environ 85% de la masse des éoliennes est aujourd'hui recyclée et valorisée, donc l'étude portera exclusivement sur les matériaux à ce jour peu valorisés tels que les matériaux composites composant les pales. » Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie – Rapport complet – 09/2017 (p.302)

Recyclage du béton

Le béton après concassage fin est utilisé sur des chantiers de travaux publics comme sous-couches routières ou équivalent, voire en matériaux de remblais de carrières. En cas de repowering, le béton recyclé peut directement servir sur le chantier pour les voies ou les plateformes, ce qui représente un optimum pour le transport. Une autre solution actuellement en recherche & développement est la réutilisation de tout ou partie de ce béton concassé pour de nouvelles fondations.

Le recyclage et le traitement du béton ne représente donc pas d'autre impact environnemental que celui des émissions de gaz à effet de serre des véhicules de chantier et du transport routier.

Voir démantèlement des fondations pour plus de détail.

Recyclage des métaux : acier, fonte, cuivre, aluminium

L'ensemble des métaux ferreux et non ferreux issues du démantèlement de l'éolienne ne présentent aucune difficulté de recyclage. Ce sont des matériaux dont la valeur marchande est intéressante car facilement recyclables. En effet, leurs caractéristiques techniques après traitement sont identiques à celles des matériaux neufs. Ces métaux revendus permettent de financer une partie des coûts de démantèlement.

Valorisation des composites

Les matériaux composites utilisés dans l'éolien, en particulier pour les pales et la coque de la nacelle, sont principalement des résines, des fibres de verre ou de carbone. Ce sont des composites classiques que l'on retrouve également dans de nombreux autres secteurs : transports dont maritime, le BTP, le secteur électrique électronique et l'aéronautique. L'éolien représente 7 % du marché français.

« L'énergie éolienne représente 7 % du marché français des matériaux composites » Source : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.36)

Actuellement, les pales sont revalorisées énergétiquement, en tant que déchet industriel banal, par l'incinération en cimenterie principalement. Leur pouvoir calorifique est supérieur à celui du bois ce qui est fait un bon combustible. Le recyclage des composites représente l'enjeu le plus important pour la filière éolienne. Il existe plusieurs pistes intéressantes actuellement en recherche & développement pour un recyclage des pales existantes et de nouvelles solutions futures de pales plus facilement recyclables. Une bonne synergie avec les autres industries utilisant des composites permettra également d'améliorer les solutions de fin de vie.

Le chiffre clé

90

90 % des matériaux composants l'éolienne sont aisément recyclables en fin de vie, 98 % si l'on exclut la fondation.

Le développement de l'éolien a-t-il un impact sur l'activité des centrales à charbon ou à fioul ?

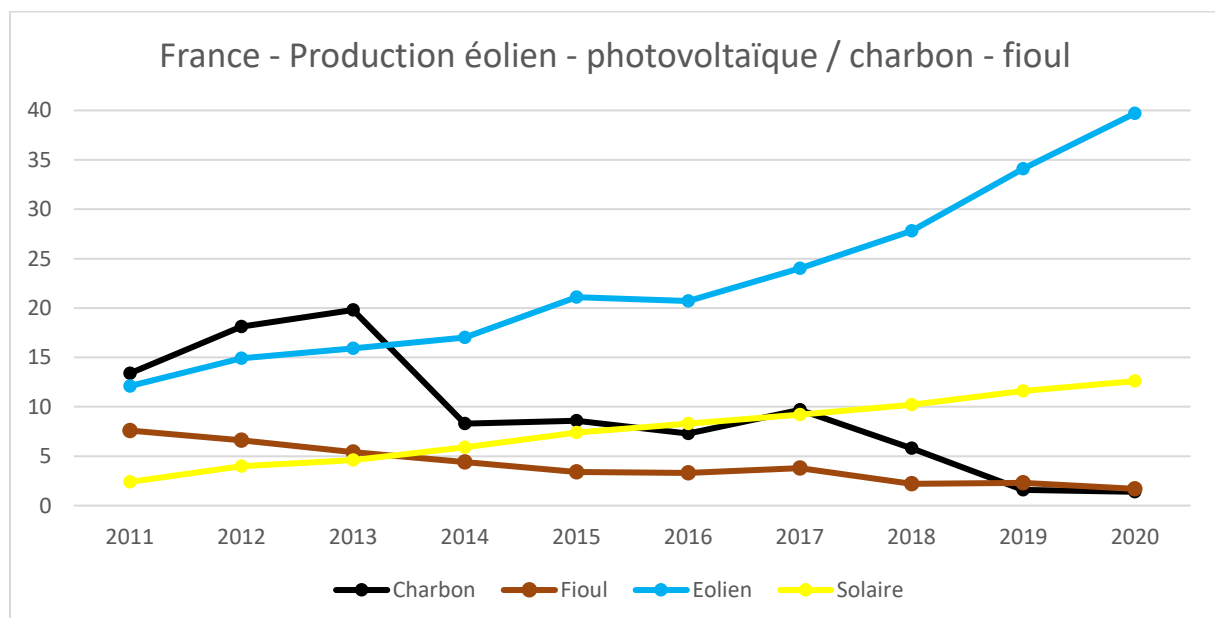
Aujourd'hui en France, la hausse croissante d'unités de production électrique d'origine éolienne ou photovoltaïque permet de fermer des centrales à charbon ou des centrales au fioul. Ces dernières étant les plus émettrices de gaz à effet de serre, le bénéfice pour le climat est très important. L'idée reçue selon laquelle la puissance installée en éolien doit être doublée par une puissance équivalente basée sur le charbon ou le fioul est contredite par les experts et les faits, comme le montre le graphique détaillé ci-dessous.

« Une production d'électricité renouvelable en hausse réduit le besoin au moyen de production de pointe de type thermique à flamme. » Source : RTE – Bilan électrique 2018 (p.37)

Grâce à l'augmentation constante de la production d'électricité éolienne et photovoltaïque, le mix énergétique français évolue. Cette production d'origine renouvelable se substitue actuellement à d'autres moyens de production, en priorité les centrales à charbon et au fioul, les plus émettrices de CO₂. L'éolien et le photovoltaïque permettent ainsi d'abandonner les moyens de production les plus polluants et les plus anciens, réduisant ainsi les émissions moyennes de CO₂ de la production d'électricité.

« Une analyse des données historiques disponibles montre que l'électricité éolienne se substitue à la production des centrales nucléaires et au gaz, charbon ou fioul » Source : Ademe – Filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie synthèse – 09/2017 (p.13)

Le graphique suivant présente l'évolution de la production d'électricité de 2011 à 2020 pour les 4 filières étudiées. On constate clairement une augmentation notable de la production à partir d'éolien et de photovoltaïque alors que la production à base de charbon et de fioul devient quasiment nulle.



Source des données : RTE données Eco2mix pour les années 2012 à 2020

L'idée reçue selon laquelle la puissance installée en éolien doit être doublée par une puissance équivalente en production polluante (type charbon) est donc contredite dans les faits, particulièrement en France.

Il faut noter que l'éolien s'insère dans un mix énergétique déjà performant. Le charbon et le fioul ne sont pas les seules sources capables d'assurer l'équilibre : c'est également le cas de l'hydraulique, qui est renouvelable. Les interconnexions avec les pays voisins permettent également d'atteindre un équilibre basé sur plusieurs pays.

« Développer un système reposant à 70 % sur des EnR ne conduit en aucun cas à « doubler » la capacité renouvelable par des moyens thermiques : il est tout à fait possible d'assurer la sécurité d'approvisionnement en se basant sur un développement « modéré » de ces moyens et des flexibilités. A contrario, les argumentaires alarmistes consistant à considérer nécessaire le développement de moyens de secours systématiques font fi, d'une part, de l'interconnexion de la France avec ses voisins qui permet de mutualiser les flexibilités, et d'autre part, d'une analyse de la contribution statistique de l'éolien et du photovoltaïque à la sécurité d'approvisionnement »

Source : RTE Bilan prévisionnel 2017 de l'équilibre offre demande d'électricité en France (p.279)

Par ailleurs, la production électrique éolienne est certes variable mais elle est finement prévisible plusieurs jours à l'avance. [\(Voir variabilité de la production éolienne\)](#)

Le cas de l'Allemagne pris en exemple pour illustrer l'interaction entre éolien et charbon est également démenti par les chiffres : [Voir : L'Allemagne ajoute-t-elle du charbon pour compenser son éolien ?](#)

Le chiffre clé

1200

Une centrale à charbon émet jusqu'à 1200 grammes de CO_{2eq} pour chaque kilowattheure produit. Installer des parcs éoliens ou photovoltaïques permet la fermeture de ces centrales très émettrices de gaz à effet de serre.

Quel est l'impact de l'éolien sur l'extraction de terres rares ?

Les terres rares regroupent un ensemble de 17 métaux. Contrairement à leur appellation, ces métaux sont en fait aussi abondants que le nickel ou le cuivre, ils ne sont donc pas si rares, mais beaucoup plus dispersés dans la croûte terrestre. Cela implique des précautions lors de leur exploitation, pour prévenir les pollutions qu'elles peuvent engendrer. Cet enjeu des terres rares reste minoritaire lors des débats sur l'éolien, puisque 97 % des éoliennes installées en France n'utilisent pas de terres rares dans leur génératrice. Les 3,3 % d'éoliennes concernées par les terres rares utilisent des aimants permanents, qui impliquent un recours aux terres rares. L'utilisation des terres rares n'est donc pas indispensable pour l'énergie éolienne. Il s'agit simplement d'un choix technologique, actuellement très minoritaire.

Proportion des éoliennes avec terres rares en France

97 % des éoliennes installées en France n'utilisent pas de terres rares dans leur génératrice. Le procès qui est fait aux éoliennes de consommer de grandes quantités de terres rares n'est donc pas fondé, particulièrement sur le territoire français et s'agissant d'éoliennes terrestres. Sur les 3 658 éoliennes étudiées dans le rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'éolien français, 83 éoliennes utilisaient des aimants permanents (qui contiennent des terres rares) soit 2,3 % du total (Cycleco pour l'Ademe 12/2015 chiffres p.20)

« Le parc éolien terrestre français est peu consommateur d'aimants permanents : seuls 3 % de la capacité installée y a recours. » Source : Ademe – Les avis de l'Ademe l'énergie éolienne – 04/2016

« En France, seuls 3 % du parc éolien terrestre installé comportent des aimants permanents » Source : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.7)

D'après les chiffres des installations fin 2018, on comptabilisait moins de 3 % d'éoliennes ayant recours à des terres rares par leur choix technologique.

- Vestas a installé en France un modèle de turbine synchrone à aimants permanents avec multiplicateur la Vestas V112 3.0 Gridstream qui représente environ la moitié des V112 soit 180 MW installés en France.
- Siemens-Gamesa dispose d'un modèle utilisant des aimants-permanents, en l'occurrence la plateforme Siemens 3.X direct drive qui représente 316 MW installés fin 2018.
- Chez les autres constructeurs minoritaires, les technologies des marques WinWind, Vensys, Goldwind et Poma Leitwind utilisent des aimants permanents. Ces constructeurs cumulent 54 MW de puissance installée.

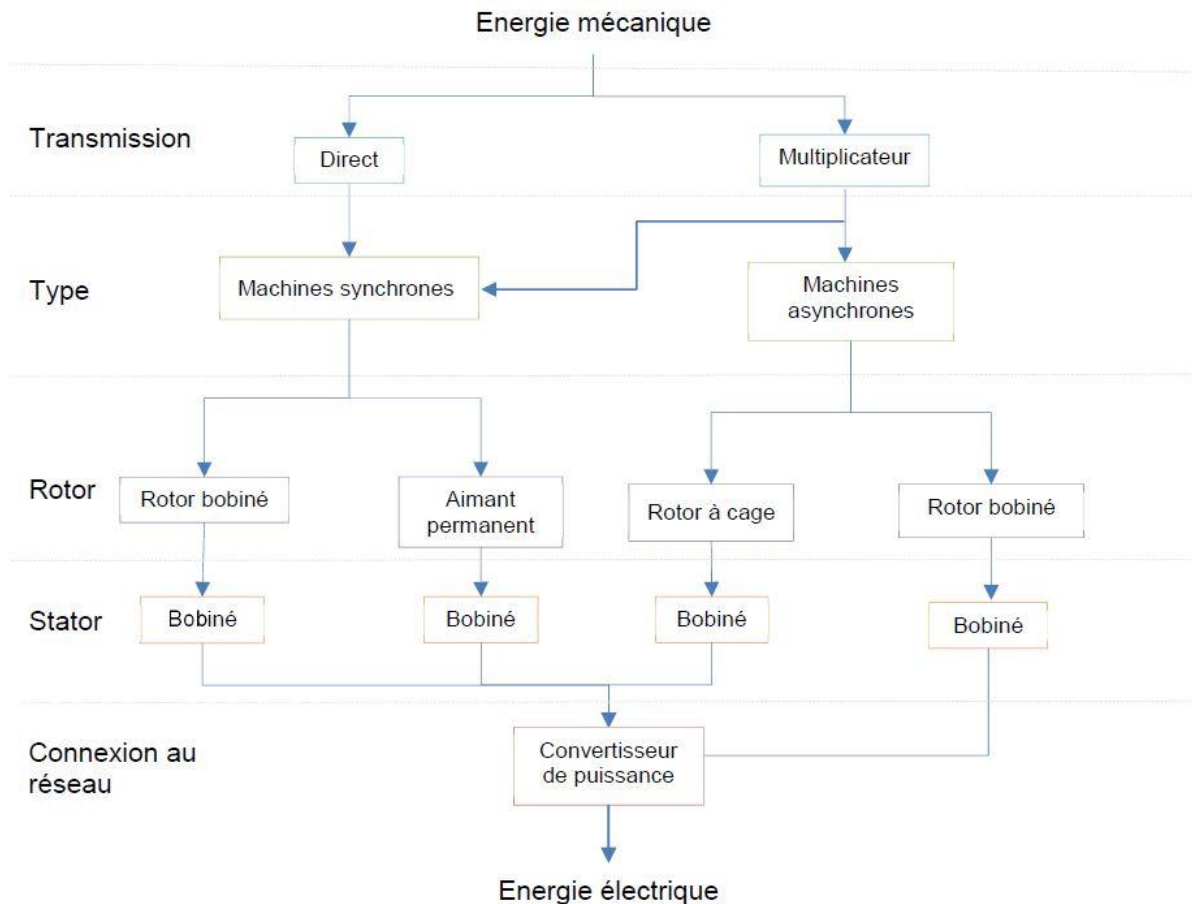
Au total 550 MW de puissance installée en France soit 2,9 % du parc français utilise des aimants permanents.

« En terrestre, aucune modification majeure de la structure du parc éolien n'est prévue pour les années à venir, et les aimants permanents devraient rester très largement minoritaires. » Source : Ademe – Fiche technique : Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie – 12/2019 (p.7)

Technologie des éoliennes avec terres rares

Seules les éoliennes utilisant une technologie synchrone nécessitant des aimants permanents ont besoin d'une certaine quantité de terres rares. Dans ce cas, les terres rares représentent environ 30 % de la masse des aimants permanents, dont une majorité de néodyme puis du praséodyme, du dysprosium et du terbium. Ces matériaux permettent de construire des aimants puissants et compacts.

« Les terres rares interviennent dans la composition des générateurs dits « synchrones » dans lequel le rotor est un aimant permanent. » Source : Ministère de la Transition Écologique et Solidaire – Programmation Pluriannuelle de l'Énergie 2019-2023 / 2024-2028 (Projet pour consultation)



Description des technologies de conversion d'énergie pour les éoliennes. Source : Cycleco pour l'Ademe – Rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'éolien français – 12/2015 (p.17)

L'utilisation des terres rares n'est donc pas indispensable pour l'énergie éolienne. Il s'agit simplement d'un choix technologique actuellement très minoritaire.

Le choix d'une technologie à aimants permanents permet une génératrice plus compacte et donc moins de poids en nacelle. C'est la raison pour laquelle les génératrices à aimants permanents sont majoritairement utilisées pour les éoliennes en mer (offshore), d'autant que ces dernières sont plus puissantes. Ce sont également des éoliennes dont les coûts de maintenance sont plus élevés, du fait de leur localisation, et qui exigent des technologies avec une maintenance réduite.

La technologie à aimant permanent avec transmission directe nécessite environ 8 fois plus d'aimants permanents que celle avec multiplicateur, qui permet de réduire significativement la taille de la génératrice.

Réduction et alternatives aux terres rares

Les terres rares regroupent un ensemble de 17 métaux dont les 4 nécessaires pour les aimants permanents représentent environ 20 % du volume extrait. Ces matériaux ne sont en fait pas vraiment rares à l'échelle mondiale, mais ils sont très peu concentrés dans la croûte terrestre. Leur extraction liée à d'autres matériaux, est donc limitée aux sites avec une bonne concentration. Les constructeurs qui ont recours à ce type de matériaux sont très attentifs aux conditions d'extraction de cette matière première.

« La problématique de l'utilisation des aimants permanents a donc été bien prise en compte par les constructeurs. Ce n'est donc pas un sujet critique pour les éoliennes terrestres. » Source : Ademe – Fiche technique : Terres rares, énergies renouvelables et stockage d'énergie – 12/2019 (p.7)

Depuis 1970, les terres rares sont utilisées dans de nombreuses autres applications et technologies telles que l'automobile, l'aéronautique, la téléphonie, l'informatique, le pétrole...

Les constructeurs utilisant ce type de technologie travaillent sur des aimants permanents utilisant une part plus faible de terres rares, en particulier les terres rares lourdes. Certaines recherches portent également sur des aimants permanents substituant la ferrite aux terres rares.

« Les fabricants d'éoliennes cherchent à s'affranchir de cette dépendance en utilisant des aimants permanents à plus faible teneur en terre rare (réduction d'un quart de la quantité de dysprosium), voire en développant des prototypes de génératrice synchrone sans aimants à terres rares (ils sont remplacés par des aimants à ferrite) » Source : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.41)

Rappelons par ailleurs que la consommation des terres rares concerne de nombreux autres secteurs que l'éolien offshore. Il s'agit donc d'un sujet plus large à traiter à l'échelle mondiale et industrielle.

Le chiffre clé

97

97 % des éoliennes installées en France n'utilisent pas de terres rares dans leur génératrice.

Quelle est la consommation électrique interne d'une éolienne ?

La consommation électrique interne d'une éolienne est minime. Elle représente en moyenne 1 % de sa production annuelle d'électricité. Cette consommation est nécessaire à son fonctionnement interne, par exemple pour orienter la nacelle face au vent, orienter les pales pour optimiser leur portance, pour faire fonctionner les ordinateurs de contrôle, ou encore pour les balisages aéronautiques (les flashes clignotants).

Les éoliennes sont raccordées au réseau électrique moyenne ou haute tension (HTA / HTB) afin d'évacuer l'énergie produite. Le niveau de tension utilisé est généralement de 20 000 volts ce qui correspond à celui du réseau de distribution d'électricité en France géré par Enedis.

Les éoliennes nécessitent également une connexion au réseau pour assurer leur indispensable alimentation interne. La consommation électrique interne représente une très faible part de la production annuelle, environ 1 %. L'éolienne produit donc 100 fois plus d'énergie que ce qu'elle consomme pour son propre fonctionnement, ce qui représente un très bon ratio comparativement à d'autres moyens de production électrique.

Par exemple, une éolienne de 3,5 MW (3 500 kW) qui fonctionne 2 500 heures par an (**Voir facteur de charge de l'éolien**), produira 8 750 000 kWh. Sa consommation électrique interne varie fortement en fonction des saisons et des conditions externes. Elle peut varier entre quelques kW et quelques dizaines de kW. Elle est en moyenne de 10 kW soit 87 600 kWh sur l'année, la consommation représente 1 % de sa production moyenne annuelle.

Les éléments principaux qui contribuent à la consommation électrique interne sont :

- Les moteurs hydrauliques dont les moteurs d'orientation des pales (pitch) qui font pivoter les pales pour optimiser la portance en fonction du vent.
- Les moteurs de lacet (Yaw) qui orientent la nacelle face au vent pour que l'éolienne puisse démarrer et qu'elle soit toujours dans la bonne direction.
- Les ventilateurs de refroidissement du générateur pour contrôler la température du générateur l'électricité.
- Les pompes à eau ou à huile pour la lubrification.
- Les contrôleurs hydrauliques.
- Les éventuels systèmes de chauffage.
- Les ordinateurs de contrôle et les serveurs informatiques.
- Les balisages aéronautiques fonctionnant jour et nuit pour la sécurité aérienne (**Voir balisage**).

Le chiffre clé

1

1% c'est la proportion d'électricité consommée par une éolienne pour son fonctionnement interne en moyenne dans l'année par rapport à sa production.

Réglementation de l'éolien



Quelle réglementation pour le démantèlement des fondations ?

En France, le démantèlement des fondations est très clairement encadré par la loi. L'arrêté du 10 décembre 2021 prévoit qu'en fin de vie d'un parc éolien, l'excavation des fondations doit être complète. Cette obligation concerne donc la totalité des fondations, jusqu'à la base de leur semelle (sauf très rare exception, du fait d'une étude démontrant que le bilan environnemental du décaissement total est défavorable). Les fondations seront donc évacuées afin de remettre les terres à disposition pour leur usage précédent (souvent agricole voire forestier). Techniquement, ce type de chantier ne pose pas de problème et demande seulement quelques semaines de travail, avant le recyclage du béton et de la ferraille. L'exploitant du parc couvre l'ensemble des coûts inhérents au démantèlement des fondations et de l'ensemble du parc éolien.

Le démantèlement des fondations est un sujet récurrent dans l'éolien, même s'il est bien encadré d'un point de vue réglementaire et ne présente pas de difficulté technique. Les fondations sont détruites à l'aide d'un brise roche (pelle mécanique équipée d'un marteau piqueur), ce qui nécessite quelques jours de travail. Le béton concassé est séparé de la ferraille pour leur recyclage respectif (**Voir fin de vie et recyclage**). Ce travail de déconstruction ne présente pas de difficulté particulière pour les filières du bâtiment.

« La France dispose d'un nombre significatif d'industriels du recyclage en capacité d'assurer la maîtrise d'œuvre de chantiers de démantèlement des éoliennes et de valorisation des matériaux qui en sont issus. » Source : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.31)

Le nombre de cas de démantèlement de parc éolien de taille importante reste limité en France. Toutefois les premières expériences et les autres exemples en Europe n'ont pas révélé de problématiques particulières d'un point de vue technique ou de surcoût financier.

Réglementation depuis 2021

La réglementation française prévoit les conditions de démantèlement de la fondation de l'éolienne. Jusqu'au 30 juin 2020, c'est l'Arrêté du 26 août 2011 qui prévoyait les conditions de démantèlement. Jusqu'à cette date la profondeur de décaissement des fondations dépendait de la nature du sol. Pour rappel les fondations font généralement 2 à 4 mètres d'épaisseur en dessous du sol. (**Voir taille et puissance**)

A présent, c'est l'arrêté du 10 décembre 2021 qui prévoit les conditions de démantèlement des fondations. L'excavation doit être complète sauf exception justifiée pour des raisons environnementales sur la base d'une étude dédiée.

« L'excavation de la totalité des fondations jusqu'à la base de leur semelle, à l'exception des éventuels pieux. Par dérogation, la partie inférieure des fondations peut être maintenue dans le sol sur la base d'une étude adressée au préfet démontrant que le bilan environnemental du décaissement total est défavorable, sans que la profondeur excavée ne puisse être inférieure à 2 mètres dans les terrains à usage forestier au titre du document d'urbanisme opposable et 1 m dans les autres cas. Les fondations excavées sont remplacées par des terres de caractéristiques comparables aux terres en place à proximité de l'installation »

Source : [Legifrance](#) Extrait de l'Arrêté du 10 décembre 2021 portant modification des prescriptions relatives aux installations de production d'électricité utilisant l'énergie mécanique du vent au sein d'une

installation soumise à autorisation au titre de la rubrique 2980 de la législation des installations classées pour la protection de l'environnement.

A la fin de vie du parc éolien, les fondations sont donc totalement évacuées afin de remettre les terres à disposition pour leur usage précédent (souvent agricole voire forestier). L'exploitant du parc couvre l'ensemble des coûts inhérents au démantèlement des fondations et de l'ensemble du parc éolien. L'arrêté du 10 décembre 2021 prévoit également en sécurité une garantie financière, fonction de la puissance de l'éolienne, et dédiée en cas de faillite de l'exploitant. (Voir [garantie financière démantèlement](#))

Excavation complète des fondations

La filière éolienne, au travers par l'association France Energie Eolienne (FEE) et le Syndicat des Energies Renouvelables (SER), a travaillé avec le gouvernement sur les questions de fin de vie des parcs éoliens. C'est le résultat de ce travail et d'une position volontaire d'amélioration continue de la filière qui a conduit à cette nouvelle réglementation. A noter que de nombreuses autres industries ou moyens de production électriques ne sont pas soumises à ce niveau d'exigence concernant le démantèlement.

Repowering

Dans le cas du repowering (le remplacement d'anciennes éoliennes par des nouvelles), l'exploitant demande une nouvelle autorisation pour un nouveau parc éolien. Généralement, ce nouveau parc est plus puissant et produit d'avantage d'électricité car il bénéficie d'une génération plus récente d'éolienne. Quand il n'y a pas de contraintes de limitations en hauteurs, les nouvelles éoliennes peuvent être plus hautes. Avec ces nouvelles dimensions le nombre d'éoliennes du parc est réduit bien que la production globale soit plus importante.

Ce nouveau parc nécessite de nouvelles autorisations et donc un dossier complet et une instruction de la demande. Après obtention des autorisations le précédent parc peut être démantelé pour la construction du nouveau. Certaines installations peuvent être réutilisées comme une partie du réseau électrique ou des chemins d'accès.

En revanche les fondations ne sont pas réutilisables. Si les mêmes emplacements sont utilisés l'excavation complète des fondations est donc nécessaire pour couler les nouvelles.

*« En pratique, dans le cas fréquent d'un repowering avec implantation à l'identique des nouvelles éoliennes, les anciennes fondations sont systématiquement enlevées, quelle que soit leur profondeur. »
Source : CGEDD & Conseil général de l'économie – Rapport Economie circulaire dans la filière éolienne terrestre en France 05/2019 (p.34)*

Le chiffre clé

100

100 % des fondations doit faire l'objet d'une excavation. Cette obligation concerne donc la totalité des fondations, jusqu'à la base de leur semelle, comme l'indique l'arrêté du 10 décembre 2021

Quelle est la distance réglementaire entre éoliennes et habitations ?

En France, la distance réglementaire minimum entre une éolienne et une habitation est de 500 mètres. Cette réglementation est régie par le code de l'environnement. Elle s'applique à toutes les habitations, qu'il s'agisse d'une maison isolée ou d'un village. La distance constatée sur les parcs en exploitation est très souvent supérieure à ce minimum de 500 mètres. Certaines études peuvent induire une distance plus importante comme le résultat de l'insertion paysagère ou le respect de la réglementation acoustique.

Réglementation des 500 mètres

La distance réglementaire minimum entre une habitation et une éolienne est de 500 mètres, elle est régie par le code de l'environnement. C'est la loi Grenelle II et ses décrets qui prévoient que les parcs éoliens soient soumis au régime des Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE). Depuis 2010, elle implique également la distance réglementaire des 500 mètres. C'est une distance minimale, qui est très souvent plus importante en particulier du fait de l'application des normes acoustiques françaises rigoureuses.

« La délivrance de l'autorisation d'exploiter est subordonnée au respect d'une distance d'éloignement entre les installations et les constructions à usage d'habitation ... Elle est au minimum fixée à 500 mètres » Source Legifrance : Article L553-1 du code de l'environnement

Cette distance est compatible avec le respect du voisinage pour les habitations les plus proches comme le rappelle l'Anses (l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail) dans son rapport de 2017.

« L'agence rappelle que la réglementation actuelle prévoit que la distance d'une éolienne à la première habitation est évaluée au cas par cas, en tenant compte des spécificités des parcs. Cette distance est au minimum de 500 m, elle peut être étendue, à l'issue de la réalisation d'une étude d'impact, afin de respecter les valeurs limites d'exposition au bruit. » Source : Anses – Rapport Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens – mars 2017 (p.19)

Au-delà de la distance réglementaire, d'autres critères comme les caractéristiques de l'éolienne, l'environnement paysager et patrimonial ainsi que les niveaux acoustiques déterminent la bonne distance avec les habitations. La réglementation française protège autant les habitations isolées que les hameaux ou les bourgs, car les prescriptions sont identiques.

Une enquête réalisée pour le Syndicat des Energies Renouvelables (SER) par l'institut de sondage BVA auprès de 900 personnes vivant à proximité d'un parc éolien, dont 230 personnes à moins de 1 000 mètres, révèle que

« 84 % des personnes interrogées estiment que le parc éolien est situé à bonne distance des habitations. » Source : [Enquête BVA pour Syndicat des énergies renouvelables - Vivre à proximité d'un parc éolien - février 2016](#)

Comparaison avec d'autres pays

La distance réglementaire entre habitation et éolienne varie selon les pays voire les régions. Voici les exemples tirés du rapport précité de l'Anses :

- En Allemagne cette distance varie selon les Landers (régions allemandes) d'un minimum de **300 à 1000 mètres pour les logements isolés** ou petits lotissements et de **500 à 1000 mètres pour les zones résidentielles.**

- Au Danemark, une distance d'éloignement égale à **quatre fois la hauteur de l'aérogénérateur** est requise.
- Aux Pays-Bas, la législation néerlandaise impose une distance minimale d'éloignement par rapport aux habitations les plus proches. Cette distance est d'au minimum **4 fois la hauteur du mât**, soit en pratique de l'ordre de 400 mètres et plus.
- En Suisse, la préconisation non réglementaire est une distance minimale **de 300 mètres** entre une éolienne d'au moins 70 mètres de hauteur (au niveau du moyeu) et une zone urbanisée ou une habitation.
- Au Canada en Ontario, les éoliennes de plus de 50 kW produisant un niveau de puissance acoustique LWA supérieur à 102 dBA doivent maintenant respecter la distance minimale de **550 m de tout bâtiment fréquenté**.
- En Finlande, Grande-Bretagne, Pologne, Suède, Australie, Canada – Alberta, Nouvelle-Zélande au Japon, **aucune distance minimale d'éloignement** de l'installation par rapport aux habitations les plus proches n'est réglementée.

Débat parlementaire

Le sujet de la distance d'éloignement entre les éoliennes et les habitations est régulièrement débattu au Parlement et les réponses des gouvernements successifs ont toujours confirmé la distance actuelle de 500 mètres minimum instaurée en 2010. Par exemple la réponse du 16/06/2020 par le MTES au député Jean-Luc Warsmann dont voici un extraits :

« ... Concernant le risque de survenue des accidents, le retour d'expérience ne remet pas en cause cette distance d'éloignement. Concernant les impacts, l'académie de médecine a étudié l'opportunité de modifier cette distance pour la porter à 1 000 mètres. Son rapport, publié en 2017, souligne que « le rôle des infrasons, souvent incriminé, peut être raisonnablement mis hors de cause à la lumière des données physiques, expérimentales, et physiologiques » et que « en tout état de cause, la nuisance sonore des éoliennes de nouvelles générations ne paraît pas suffisante pour justifier un éloignement de 1 000 mètres », que « le rôle négatif des facteurs visuels ne tient pas à une stimulation stroboscopique » et que « le rythme de clignotement des feux de signalisation est nettement situé au-dessous du seuil épileptogène » ... La distance minimale d'éloignement des éoliennes vis-à-vis des habitations imposées dans la réglementation française est donc du même ordre de grandeur que celle appliquée par nos pays voisins. » [Source : Question N°27102 Assemblée Nationale.](#)

Le chiffre clé

500

En France, la distance réglementaire minimum entre une éolienne et une habitation est de 500 mètres au minimum. Elle s'applique à toutes les habitations, qu'il s'agisse d'une maison isolée ou d'un village.

Que dit la réglementation sur le balisage lumineux ?

Les éoliennes sont équipées d'un balisage réglementaire, en raison de leur hauteur. Il s'agit d'un flash qui clignote en blanc la journée et en rouge la nuit, afin qu'elles soient visibles depuis toutes les directions, pour assurer la sécurité aérienne. Pour réduire au maximum la pollution lumineuse, les flashes rouges, utilisés la nuit, sont dix fois moins puissants que les flashes blancs émis durant la journée. Dans une démarche constante d'amélioration, plusieurs pistes sont également explorées par les professionnels de l'éolien en concertation avec le gouvernement, afin de réduire l'impact visuel du balisage : variation selon les conditions météorologiques, réorientation des lumières vers le haut, etc.

Réglementation actuelle

En tant qu'obstacles de grandes hauteurs, les éoliennes respectent la réglementation française pour la sécurité aérienne civile et militaire. Pour cela, elles sont équipées d'un balisage réglementaire : un flash qui clignote le jour en blanc et la nuit en rouge. La dernière version de la réglementation étant :

Arrêté du 23 avril 2018 relatif à la réalisation du balisage des obstacles à la navigation aérienne [Lien](#)

La balise est installée au point le plus haut de la nacelle, pour assurer une visibilité dans toutes les directions sur 360°. Pour l'ensemble des éoliennes d'un parc appartenant au même exploitant, les flashes ainsi que le passage en mode jour / nuit, doivent être synchronisés.

Le **balisage de jour** est un feu d'obstacle moyenne intensité de type A, feu à éclat blanc de 20 000 candelas (Cd). Le **balisage de nuit** est un feu d'obstacle moyenne intensité de type B, feu à éclat rouge de 2 000 candelas (Cd), donc dix fois moins puissant. Pour les éoliennes de 150 à 200 mètres de hauteur totale, 4 balises de basse intensité (rouge fixe 32 Cd) sont placées autour du mât à 45 mètres de hauteur.

	Balisage diurne	Balisage nocturne
Eolienne de 50 à 150 mètres de hauteur totale	Au sommet : Flash blanc 20 000 Cd	Au sommet : Flash rouge 2000 Cd
Eolienne de plus de 150 mètres de hauteur totale	Idem	En complément, au niveau intermédiaire : lumière rouge fixe basse intensité

La détection du passage en mode nocturne ou diurne se fait en fonction du niveau de lumière naturelle, qui est mesuré au niveau de l'éolienne référente du parc.

Les plus anciens balisages utilisent la technologie Xenon, alors que les plus récents sont équipés de LED (depuis 2008 à 2010). La technologie LED présente une consommation plus faible, une plus grande fiabilité, un flash moins intense et elle est plus facilement paramétrable.



Photo d'un balisage installé en nacelle

La réglementation française est particulièrement stricte concernant le balisage qui s'applique à toutes les éoliennes, indépendamment de la proximité ou non d'enjeux aéronautiques. Dans d'autres pays européens, le balisage n'est obligatoire qu'à proximité des aéroports et peut dans certaines situations être substitué par des bandes rouges sur les pales ou sur le mât.

Bien que ces balises à éclats puissent être perçues comme une gêne par certains riverains proches, elles n'impliquent aucun risque sanitaire. La fréquence étant de 20 éclats d'une seconde par minute, elle est bien en deçà du seuil épileptogène.

« Le rythme de clignotement des feux de signalisation est-il nettement situé au-dessous du seuil épileptogène. » Source : Académie de médecine – Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres – 05/2017 (p.12)

Evolutions à l'étude

Conscient de la gêne induite par ce balisage, les professionnels de l'éolien étudient des solutions alternatives. Depuis plusieurs années la filière travaille en concertation avec la Direction générale de l'aviation civile et l'armée de l'air. Une nouvelle réglementation devrait être mise en place pour y répondre.

Plusieurs pistes sont à l'étude pour réduire l'impact visuel du balisage, dont certaines sont déjà appliquées dans d'autres pays :

- Synchroniser les flashes de l'ensemble du parc éolien français.
- Panacher les feux pour ne conserver le balisage actuel que pour les éoliennes aux extrémités du parc et baisser celui des autres éoliennes (voire passer à un feu fixe).
- Diminuer l'intensité lumineuse pour l'orientation vers le sol (donc visible par les riverains) ou réorienter les feux vers le ciel uniquement.
- Varier l'intensité lumineuse en fonction de la visibilité constatée selon les conditions météorologiques.

- Allumer les balises uniquement à la détection d'un avion dans une zone large et/ou par zone géographique commandée par l'armée selon les entraînements.

Le chiffre clé

10

Pour réduire au maximum la pollution lumineuse, les flashes rouges, utilisés la nuit, sont dix fois moins puissants que les flashes blancs émis durant la journée.

Sources

Gouvernement français : organisme, ministère, entreprise publique

Ministère de la Transition Écologique et Solidaire & CGED : Commissariat général au développement durable - www.ecologique-solidaire.gouv.fr

- Datalab - Les énergies renouvelables en France en 2018 – 09/2019

Ministère de la transition énergétique : Statinfo – [tableau de bord éolien 2e trimestre 2022](#)

Région Nouvelle-Aquitaine - Rapport d'objectifs du SRADDET – 12/2019

Ademe :

- Cycleco pour Ademe – Impacts environnementaux de l'éolien français – Données 2015
- Etude sur la filière éolienne française : bilan, prospective et stratégie – Rapport complet – 09/2017

- Les avis de l'Ademe l'énergie éolienne – 04/2016

- Cycleco – Impacts environnementaux de l'éolien français – Données 2015

Anses (Agence Nationale Sécurité Sanitaire Alimentaire Nationale) – Rapport Evaluation des effets sanitaires des basses fréquences sonores et infrasons dus aux parcs éoliens – mars 2017

Académie de médecine – Nuisances sanitaires des éoliennes terrestres – 05/2017

RTE Réseau de transport d'électricité :

- Bilan électrique 2021 [version en ligne](https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/) : <https://bilan-electrique-2021.rte-france.com/>
- Bilan électrique 2020 [version en ligne](https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/) : <https://bilan-electrique-2020.rte-france.com/>
- Bilan électrique 2019
- Bilan électrique 2018
- Bilan prévisionnel 2017 de l'équilibre offre demande d'électricité en France
- Note : Précisions sur les bilans CO2 établis dans le bilan prévisionnel et les études associées. - 2019

IEA (Agence international de l'énergie) – [energy statistics data browser](#)

FEE France Energie Eoliennes

- *Capgemini invent pour FEE - Observatoire de l'éolien 2020 – 09/2020*
- *Capgemini invent pour FEE - Observatoire de l'éolien 2021 – 09/2021*

SER – Syndicat des énergies renouvelables

[Enquête BVA pour Syndicat des énergies renouvelables - Vivre à proximité d'un parc éolien - février 2016](#)

Vestas

Nordex

Enercon

Sites internet spécialisés :

[Connaissances des énergies](http://www.connaissancedesenergies.org) : www.connaissancedesenergies.org

International :

[Wind Europe](http://www.windeurope.org) : Association de l'énergie éolienne européenne – www.windeurope.org

- Wind energy in Europe – 2020 statistics and the outlook for 2021-2025 (02/2021)

[Agora Energiewende](#) : Ember & Agora - The european power sector in 2020 (01/2021)

[Ember Climate](#) : Ember - Global electricity review 2022 (03/2022)